

Patrick Jost & Moritz Thönnissen

# **Realistische Baummodelle auf der Basis von terrestrischem Laserscanning – Möglichkeiten und Potentiale**



Masterarbeit

Thema:

Realistische Baummodelle auf der Basis von terrestrischem Laserscanning  
– Möglichkeiten und Potentiale

vorgelegt durch:

Patrick Jost  
geboren am 20.06.1991  
Kirchweg 26a  
52152 Simmerath  
Matr.- Nr. : 725315

Moritz Thönnissen  
geboren am 12.09.1989  
Imigstraße 8b  
47551 Bedburg-Hau  
Matr.- Nr. : 725497

Hochschule Osnabrück  
Management im Landschaftsbau



**HOCHSCHULE OSNABRÜCK**

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Datum der Abgabe: 09.01.2018

betreuende Dozenten:

Dr. Ilona Brückner

Prof. Martin Thieme-Hack

(Erstprüfer)

(Zweitprüfer)

## Inhaltsverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| Inhaltsverzeichnis.....   | I   |
| Abbildungsverzeichnis.....  | III |
| Tabellenverzeichnis.....  | VII |
| Abkürzungsverzeichnis.....  | XI  |
| 1 Einleitung.....   | 1   |
| 2 Problemstellung.....  | 3   |
| 3 Zielstellung .....  | 5   |
| 4 Grundlagen.....   | 6   |
| 4.1 3D-Laserscanning.....   | 6   |
| 4.1.1 Stand der Technik.....  | 6   |
| 4.1.2 Funktionsweise des terrestrischen Laserscannings.....   | 14  |
| 4.1.3 Registrierung und Weiterverarbeitung von Punktwolken .....  | 31  |
| 4.1.4 Vorliegende Untersuchungen .....  | 39  |
| 4.2 3D-Computer Visualisierung.....   | 40  |
| 4.2.1 Entwicklung und Stand der Technik.....  | 40  |
| 4.2.2 Faktoren der menschlichen Wahrnehmung bei der Informationsvermittlung<br>von Bildern.....   | 46  |
| 4.2.3 Vorliegende Anwendungen und Untersuchungen in der<br>3D-Gehölzvisualisierung.....   | 51  |
| 5 Material und Methoden .....   | 61  |
| 5.1 Allgemeine Vorgehensweise .....   | 61  |
| 5.2 Beschreibung des eingesetzten Laserscanners.....  | 64  |
| 5.3 Untersuchungsobjekte und Gebiete.....   | 71  |
| 5.4 Erstellung eines Vermessungs-Protokolls.....  | 74  |
| 5.5 Entwicklung eines Kriterienkataloges zur Beurteilung und Auswahl eines<br>geeigneten Programms zur Darstellung und Weiterverarbeitung von |     |



|  |                  |
|--|------------------|
| Punktwolken.....   | 74               |
| 6 Voruntersuchung I: Probeaufnahmen und Qualitätsdefinition.....                           | 80               |
| 6.1 Probeaufnahmen und Ergebnisse.....   | 80               |
| 6.2 Untersuchung der Ergebnisse in Bezug auf die Faktoren menschlicher<br>Wahrnehmung..... | 94               |
| 6.3 Festlegung von Qualitätsmerkmalen .....  | 97               |
| 7 Voruntersuchung II: Programmuntersuchung und Festlegung zur<br>Weiterverarbeitung.....   | 101              |
| 7.1 Kriterienkatalog – Detaillierte Programmuntersuchung.....                              | 101              |
| 7.2 Wahl der Softwarelösung zum Auslesen und Darstellen von<br>Baum-Punktwolken.....       | 107              |
| 7.3 Wahl der Softwarelösung zur weiteren Bearbeitung von Punktwolken.....                  | 116              |
| 7.4 Vergleich mit bestehenden Gehölzdatenbanken.....                                       | 161              |
| 8 Durchführung und Ergebnisse der Hauptaufnahmen .....                                     | 168              |
| 8.1 Durchführung Winteraufnahmen.....  | 168              |
| 8.1.1 Bestandsaufnahme.....  | 168              |
| 8.1.2 Auslesung und Darstellung der Punktwolken .....                                      | 172              |
| 8.1.3 Weiterverarbeitung der Punktwolken.....  | 175              |
| 8.2 Durchführung Sommeraufnahmen.....  | 181              |
| 8.2.1 Bestandsaufnahme.....  | 181              |
| 8.2.2 Auslesung und Darstellung der Punktwolken .....                                      | 184              |
| 8.2.3 Weiterverarbeitung der Punktwolken.....  | 187              |
| 8.3 Ergebnisse der Hauptaufnahmen.....   | 189              |
| 9 Gesamtdiskussion .....   | 199              |
| 10 Zusammenfassung .....   | 203              |
| Literaturverzeichnis.....  | 206              |
| Eidesstattliche Erklärung.....   | 218              |
| Anhang.....  | separater Ordner |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| <i>Abbildung 1: Überblick Einleitung in die Thematik (in Anlehnung an CSC 2008, STATISTA GMBH 2017a, STATISTA GMBH 2017c)</i> .....  | 2  |
| <i>Abbildung 2: Übersicht der Problemstellungen innerhalb der Thematik</i> .....   | 4  |
| <i>Abbildung 3: Arten von 3D-Laserscanning zusammengetragen nach PFEIFER ET AL. 207, S.1; BIENERT 2013, S.13f.; BERALDIN ET AL. 2010 in BIENERT 2013, S.14; RIEGER ET AL. 2010 in BIENERT 2013, S.14; verändert nach DASSOT ET AL. 2010, S.209</i> ..... | 9  |
| <i>Abbildung 4: Laserentstehung (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.16)</i> .....   | 14 |
| <i>Abbildung 5: Funktionsweise Impulslaufzeitverfahren mit Zählereinheit (Verändert nach JOECKEL ET AL. 2008, S.18 u. 19)</i> .....  | 16 |
| <i>Abbildung 6: Funktionsweise Phasenvergleichsverfahren mit Phasendetektor (Verändert nach JOECKEL ET AL. 2008, S.37 u. 38)</i> .....   | 17 |
| <i>Abbildung 7: Funktionsweise Triangulationsverfahren (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.41)</i> .....  | 20 |
| <i>Abbildung 8: Scannerbauformen (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.41)</i> .....  | 21 |
| <i>Abbildung 9: Klassifizierung von Laserscannern (aus textlicher Ausführung zusammengefasst aus STAIGER 2003 in DOLD 2010, S.13 und DOLD 2010 S.14.ff.)</i> .....   | 22 |
| <i>Abbildung 10: Ablenkeinheit Kamerascanner (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.326)</i> .....   | 22 |
| <i>Abbildung 11: Ablenkeinheit Hybridscanner (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.327)</i> .....   | 23 |
| <i>Abbildung 12: Schwenkbereich Panoramascanner (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.329)</i> .....  | 23 |
| <i>Abbildung 13: Ablenkeinheit Panoramascanner (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.329)</i> .....   | 24 |
| <i>Abbildung 14: Gesamtkonstrukt Scanner (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.330)</i> .....   | 24 |
| <i>Abbildung 15: Messfehler (aus textlicher Ausführung zusammengefasst aus DOLD 2010, S.17ff.)</i> .....   | 26 |
| <i>Abbildung 16: Diffuse Reflexion, Spiegelreflexion, Retroreflexion (Nach FIRMA RIEGEL in TAUBER 2005, S.16f.)</i> .....  | 29 |
| <i>Abbildung 17: Reflexionskoeffizienten (Nach TAUBER 2005, S.17)</i> .....  | 29 |
| <i>Abbildung 18: Strahleneindringung bei Styropormaterialien (Nach INGENSAND, RYF, SCHULZ 2003 in TAUBER 2005, S.23)</i> .....   | 29 |
| <i>Abbildung 19: Darstellung von Eckmessfehlern (REMUS 2002 in TAUBER 2005, S.23)</i> .....  | 30 |
| <i>Abbildung 20: Von der Datenaufnahme bis zur Visualisierung (BRENNER 2008, S.171; Dold 2010, S.8f.)</i> .....  | 32 |
| <i>Abbildung 21: Prognose zur Anzahl der Virtual Reality-Nutzer weltweit in Millionen (STATISTA GMBH 2017a)</i> .....  | 41 |
| <i>Abbildung 22: Entwicklungsprozess der Virtual Reality-Methoden (zusammengefasst nach BAUMGÄRTEL ET AL. 2011, S.1f.; LAURINI in ZEILE 2010, S.28; LANGE U. HEHL-LANGE 2006 in WISSEN 2007, S.217; STATISTA GMBH 2017a)</i> .....                       | 42 |
| <i>Abbildung 23: Einteilungsmöglichkeiten von Habitusformen in visuelle Typen (nach HEINS 2015 in RAABE ET AL. 2015, S.327)</i> .....  | 50 |
| <i>Abbildung 24: Einteilungsmöglichkeiten von Habitusformen mit möglichen Aststrukturen (nach ROLOFF U. BÄRTELS 2014, S.13)</i> .....  | 51 |
| <i>Abbildung 25: Drei wesentliche Handlungsschritte (Begriffsbestimmungen in Anlehnung an AJLANI 2008, S.66)</i> .....   | 61 |

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 26: Übersicht allgemeine Vorgehensweise .....  | 63  |
| Abbildung 27: Faro Focus 3DS.....  | 67  |
| Abbildung 28: Dimensionen des Faro Focus <sup>3D</sup> (nach FARO<br>(in Anlehnung an FARO 2013, S.1) 2013 a, S.121).....  | 67  |
| Abbildung 29: Benötigte Aufnahmematerialien .....  | 71  |
| Abbildung 30: Testgebiet 1 (Kartenauszug aus AEROWEST, KARTENDATEN 2017,<br>GEOBASIS-DE/BKG 2017, GOOGLE 2009, 52°21'10.6"N 7°59'47.4"E).....  | 80  |
| Abbildung 31: Testobjekt Eiche (Quercus robur).....  | 81  |
| Abbildung 32: Darstellung Scanaufnahme ohne Objektzuschnitt in<br>FARO SCENE Version 7.0.0.37. ....  | 88  |
| Abbildung 33: Anzeige Referenzkugeln und Scannerstandpunkte in<br>FARO SCENE Version 7.0.0.37 .....  | 88  |
| Abbildung 34 Anwendung der Polygonauswahl in FARO SCENE Version 7.0.0.37 .....   | 89  |
| Abbildung 35: Entfernung weiterer Punkte aus der von rechts gewählten Ansicht in<br>FARO SCENE Version 7.0.0.37 .....  | 90  |
| Abbildung 36: Freigeschnittene Baumpunktwolke in FARO SCENE Version 7.0.0.37.....  | 91  |
| Abbildung 37: Aufnahmeergebnis Eiche, Aufnahmeeinstellung niedrig,<br>Winter (links), Aufnahmeeinstellung hoch, Winter (Mitte) (dargestellt in FARO SCENE,<br>Version 7.0.0.37) und original Foto (rechts). .... | 91  |
| Abbildung 38: Darstellung kleiner Äste bei geringer Scaneinstellung<br>(dargestellt in FARO SCENE, Version 7.0.0.37).....  | 93  |
| Abbildung 39: Darstellung kleiner Äste bei hoher Scaneinstellung<br>(dargestellt in FARO SCENE, Version 7.0.0.37).....   | 93  |
| Abbildung 40: Fotoaufnahme Eiche (links), Scanaufnahme niedrige Einstellung<br>Eiche (rechts) und Scanaufnahme hohe Einstellung Eiche (unten)<br>(dargestellt in FARO SCENE, Version 7.0.0.37).....              | 95  |
| Abbildung 41: Nachbildung Linienmodell zur Astbildung.....   | 96  |
| Abbildung 42: Direktvergleich des Astverlaufes mittels Linienmodell,<br>links niedrige und rechts hohe Scaneinstellung<br>(dargestellt in FARO SCENE, Version 7.0.0.37).....                                     | 96  |
| Abbildung 43: Aufnahmeergebnis Eiche Aufnahmequalität mittel, Sommer (links),<br>(dargestellt in FARO SCENE, Version 7.0.0.37) und original Foto (rechts).....   | 98  |
| Abbildung 44: Direktvergleich des Astverlaufes mittels Linienmodell, links Originalfoto<br>und rechts mittlere Scaneinstellung Sommeraufnahme (dargestellt in FARO SCENE,<br>Version 7.0.0.37) .....             | 99  |
| Abbildung 45: Nahzoom Blattaufnahme .....  | 100 |
| Abbildung 46: Möglichkeiten zum Import von .fls-Dateien zur späteren<br>Weiterverarbeitung (FARO SCENE, Version 7.0.0.39, 3D-RESHAPER,<br>Version 17.0.24386.0, TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3).....            | 108 |
| Abbildung 47: Direktvergleich Eiche unbelaubt, niedrige Scaneinstellung<br>Original - 3D-Reshaper - Faro Scene (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0;<br>FARO SCENE, Version 6.2.4.30) .....                        | 110 |
| Abbildung 48: Direktvergleich Eiche belaubt, mittlere Auflösung Original -<br>3D-Reshaper - Faro Scene (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0; FARO SCENE,<br>Version 6.2.4.30) .....                                | 110 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Abbildung 49: Punktwolkendarstellung Eiche unbelaubt, importiert in unterschiedlichen Programmen (BENTLEY POINTOOL, Version 02.00.01.00; GEOMAGIC WRAP, Version 2017; CLOUDCOMPARE, Version V2.9beta; Z+F LASERCONTROL®, Version 8.9.1.21205; AUTODESK RECAP360, Version 4.2.0.2; TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3; VRMESH STUDIO, Version 9.4.0; 3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0; FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</b> | 113 |
| <b>Abbildung 50: Punktwolkendarstellung Eiche belaubt, importiert in unterschiedlichen Programmen (BENTLEY POINTOOL, Version 02.00.01.00; GEOMAGIC WRAP, Version 2017; CLOUDCOMPARE, Version V2.9beta; Z+F LASERCONTROL®, Version 8.9.1.21205; AUTODESK RECAP360, Version 4.2.0.2; TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3; VRMESH STUDIO, Version 9.4.0; 3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0; FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</b>   | 115 |
| <b>Abbildung 51: Übersicht Exportmöglichkeiten zur Weiterverarbeitung der Punktwolken</b>  | 118 |
| <b>Abbildung 52: Importmöglichkeiten in Visualisierungsprogramme (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; MAXON CINEMA 4D, Version R14)</b>   | 150 |
| <b>Abbildung 53: .rcp-Direktimport in 3ds Max Design (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)</b>   | 151 |
| <b>Abbildung 54: Renderergebnis Eiche, niedrige Scaneinstellung, unbelaubt, Vray Renderer 800x600, links ungefiltert, rechts 1x gefiltert (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)</b>  | 153 |
| <b>Abbildung 55: Renderergebnis Eiche, mittlere Scaneinstellung, belaubt, Vray Renderer 800x600, links ungefiltert, rechts 1x gefiltert (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)</b>  | 153 |
| <b>Abbildung 56: Modellansicht 3ds Max Design Eiche, links unbelaubt, rechts belaubt (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)</b>   | 154 |
| <b>Abbildung 57: Renderergebnis Faro Scene Eiche, niedrige Scaneinstellung, unbelaubt, Mental-ray Renderer 800x600, links ungefiltert, rechts 1x gefiltert (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)</b>   | 156 |
| <b>Abbildung 58: Renderergebnis Faro Scene Eiche, mittlere Scaneinstellung, belaubt, Mental-ray Renderer 800x600, links ungefiltert, rechts 1x gefiltert (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)</b>   | 156 |
| <b>Abbildung 59: Renderergebnis 3D-Reshaper Eiche, niedrige Scaneinstellung, unbelaubt, Mental-ray Renderer 800x600, links ungefiltert, rechts 1x gefiltert (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)</b>  | 157 |
| <b>Abbildung 60: Renderergebnis 3D-Reshaper Eiche, mittlere Scaneinstellung, belaubt, Mental-ray Renderer 800x600, links ungefiltert, rechts 1x gefiltert (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)</b>  | 157 |
| <b>Abbildung 61: Visualisierung in Cinema 4d, links Eiche unbelaubt, niedrige Scaneinstellung, rechts Eiche belaubt, mittlere Scaneinstellung, gerendert mit Auflösung 800 x 600 (MAXON CINEMA 4D, Version R14)</b>  | 160 |
| <b>Abbildung 62: Nahbereich-Vergleich Punktwolken- (links) und VB Visual-Modell (rechts) (AUTODESK MAX DESIGN Version 2015)</b>  | 163 |
| <b>Abbildung 63: Nahbereich-Vergleich Punktwolken- (links) und VB Visual-Modell (rechts), Blattstruktur (AUTODESK MAX DESIGN Version 2015)</b>   | 167 |
| <b>Abbildung 64: Untersuchungsgebiet 2: große Platane (Kartenauszug aus AEROWEST, KARTENDATEN 2017, GEOBASIS-DE/BKG 2017, GOOGLE 2009, 53°13'27.2"N 8°01'36.5"E)</b>   | 169 |
| <b>Abbildung 65: Aufnahmeobjekt 1, Platane groß</b>  | 169 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 66: Untersuchungsgebiet 3, kleine Platane<br>(Kartenauszug aus AEROWEST, KARTENDATEN 2017,<br>GEOBASIS-DE/BKG 2017, GOOGLE 2009, 53°14'26.1"N 7°59'14.0"E)..... | 170 |
| Abbildung 67: Aufnahmeobjekt 2, Platane klein .....   | 171 |
| Abbildung 68: Vergleich der Baumschulfelder, große Platane an der Straße<br>„Grüne Linie“ (links: März, rechts Juni).....   | 181 |
| Abbildung 69: Untersuchungsgebiet 2, große Platane<br>(Kartenauszug aus AEROWEST, KARTENDATEN 2017,<br>GEOBASIS-DE/BKG 2017, GOOGLE 2009, 53°13'16.1"N 8°01'33.0"E).....  | 182 |
| Abbildung 70: Aufnahmeobjekt 3, Platane groß .....  | 182 |
| Abbildung 71: Untersuchungsgebiet 3, kleine Platane<br>(Kartenauszug aus AEROWEST, KARTENDATEN 2017,<br>GEOBASIS-DE/BKG 2017, GOOGLE 2009, 53°14'26.1"N 7°59'14.0"E)..... | 183 |
| Abbildung 72: Aufnahmeobjekt 4, Platane klein .....   | 183 |
| Abbildung 73: Renderszene 1 mit Platane groß, unbelaubt,<br>mittlere Scaneinstellung<br>(AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016) .....  | 194 |
| Abbildung 74: Renderszene 2 mit Platane klein, unbelaubt,<br>niedrige Scaneinstellung (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015;<br>PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016) ..... | 195 |
| Abbildung 75: Renderszene 3 mit Platane groß, belaubt, mittlere Scaneinstellung<br>(AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016) .....       | 195 |
| Abbildung 76: Renderszene 4 mit Platane klein, belaubt, mittlere Scaneinstellung<br>(AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016) .....      | 196 |
| Abbildung 77: Renderszene 5 mit Platane groß, unbelaubt,<br>mittlere Scaneinstellung (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015;<br>PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016) .....  | 196 |
| Abbildung 78: Renderszene 6 mit Platane groß, belaubt, mittlere Scaneinstellung<br>(AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016) .....       | 197 |
| Abbildung 79: Renderszene 7 mit Platane klein, belaubt, mittlere Scaneinstellung<br>(AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016) .....      | 197 |
| Abbildung Deckblatt:  |     |
| Logo Hochschule Osnabrück: HOCHSCHULE OSNABRÜCK (2017)  |     |
| Laserscanner Faro: FARO (2013a)   |     |



## Tabellenverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| <i>Tabelle 1: 3D-Laserscanner (ZOLLER + FRÖHLICH GMBH 2017 a), (ZOLLER + FRÖHLICH GMBH 2017 b), (RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GMBH 2017), (¹ p/s = Punkte pro Sekunde).....</i>   | <i>12</i>  |
| <i>Tabelle 2: 3D-Laserscanner (MENSI o.J.; FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. 2017; TRIMBLE INC. 2017a) (¹ p/s Punkte pro Sekunde).....</i>  | <i>12</i>  |
| <i>Tabelle 3: 3D-Laserscanner (FARO EUROPE GMBH &amp; Co. KG 2016; LEICA GEOSYSTEMS AG – Part of Hexagon 2017a), (¹ p/s = Punkte pro Sekunde).....</i>   | <i>13</i>  |
| <i>Tabelle 4: Vergleich verschiedener Weiterverarbeitungsprogramme .....</i>   | <i>38</i>  |
| <i>Tabelle 5: Übersicht Beispiele für gängige Visualisierungsprogramme (AUTODESK 2017 a; AUTODESK 2016; MAXON COMPUTER 2017; VISION 4D 2017; RENDERMALL GMBH 2012) .....</i>   | <i>45</i>  |
| <i>Tabelle 6: Hauptfunktionen der Bildübermittlung (nach WEIDENMANN 2002 in WISSEN 2007, S.99f und WISSEN 2007, S.107ff.).....</i>   | <i>47</i>  |
| <i>Tabelle 7: Mögliche Visualisierungsprogramme für Landschaftsvisualisierungen (FAVORSKAYA U. JAIN 2017, S.90ff.; STELZL ET AL. 2006, S.642; WISSEN 2007, S.43; SEIFERT 2009, S.141; IDV INC. 2016; ONYX COMPUTING, INC. 2017a; MARLIN STUDIOS 2016a.; E-ON SOFTWARE, INC. 2017a; NGPLANT o.J.b; ALPHAPIXEL LLC 2017; ACT-3D B.V. 2012; XFROG 2017a; LAUBWERK GMBH 2011a; RENDERMALL GMBH 2012a).....</i> | <i>53</i>  |
| <i>Tabelle 8: Übersicht über Messverfahren und deren Vor- und Nachteile (Zusammenfassung gem. Angaben aus 4.1.2). .....</i>  | <i>64</i>  |
| <i>Tabelle 9: Unterschiedliche Qualitätsstufen und Sicherheitsabstände (nach FARO 2013 a, S.55f.) .....</i>  | <i>68</i>  |
| <i>Tabelle 10: Vorlage Vermessungs-Protokoll.....</i>  | <i>73</i>  |
| <i>Tabelle 11: Blanko Tabelle zur detaillierten Programmuntersuchung.....</i>  | <i>76</i>  |
| <i>Tabelle 12: Vergleichstabelle zur Beurteilung und Auswahl geeigneter Programme .....</i>  | <i>78</i>  |
| <i>Tabelle 13: Übersicht Scaneinstellungen und die damit verbundenen Zeitaufwendungen (FARO 2013 a, S.55f.) .....</i>  | <i>81</i>  |
| <i>Tabelle 14: Vermessungs-Protokoll Aufnahme Eiche, niedrige Scaneinstellung .....</i>  | <i>83</i>  |
| <i>Tabelle 15: Schnellübersicht Probeaufnahmen .....</i>   | <i>87</i>  |
| <i>Tabelle 16: Ergebnisse aus der Probeaufnahme, Winter .....</i>  | <i>92</i>  |
| <i>Tabelle 17: Ergebnisse aus der Probeaufnahme, Winter und Sommer .....</i>   | <i>98</i>  |
| <i>Tabelle 18: Programmübersicht zur detaillierten Untersuchung.....</i>   | <i>101</i> |
| <i>Tabelle 19: Programmuntersuchung Autodesk ReCap (AUTODESK 2017 b; AUTODESK RECAP360, Version 4.2.0.2). .....</i>  | <i>102</i> |
| <i>Tabelle 20: Gegenüberstellung der Programminformationen aus der detaillierten Programmuntersuchung.....</i>   | <i>106</i> |
| <i>Tabelle 21: Import der Test-Scanobjekte in 3D-Resahper, Faro Scene und Trimble RealWorks .....</i>  | <i>108</i> |
| <i>Tabelle 22: .fls-Exportmöglichkeiten und Zeitaufwendungen in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30) .....</i>  | <i>111</i> |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Tabelle 23: Programmfunktionen im Überblick (AUTODESK ReCAP360, Version 4.2.0.2; FARO SCENE, Version 6.2.4.30; GEOMAGIC WRAP, Version 2017; 3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0; VRMESH STUDIO, Version 9.4.0; CLOUDCOMPARE Version V2.9beta; TRIMBLE REALWORKS, Version 10; LEICA CYCLONE, Version 9.1.6; Z+F LASERCONTROL, Version 8.9.1.21205)</i> ..... | 117 |
| <i>Tabelle 24: Filterung mit Faro Scene, Eiche unbelaubt, niedrige Scaneinstellung, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....  | 119 |
| <i>Tabelle 25: Filterung mit Faro Scene, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....   | 119 |
| <i>Tabelle 26: Filterung mit 3D-Reshaper, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)</i> .....   | 120 |
| <i>Tabelle 27: Filterung mit 3D-Reshaper, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)</i> .....   | 121 |
| <i>Tabelle 28: Filterung mit Geomagic Wrap, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (GEOMAGIC WRAP, Version 2017)</i> .....   | 122 |
| <i>Tabelle 29: Filterung mit Geomagic Wrap, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (GEOMAGIC WRAP, Version 2017)</i> .....   | 122 |
| <i>Tabelle 30: Filterung mit CloudCompare, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (CLOUDCOMPARE Version V2.9beta)</i> .....  | 123 |
| <i>Tabelle 31: Filterung mit CloudCompare, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (CLOUDCOMPARE Version V2.9beta)</i> .....  | 124 |
| <i>Tabelle 32: Filterung mit VRMesh Studio, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (VRMESH STUDIO, Version 9.4.0)</i> .....  | 125 |
| <i>Tabelle 33: Filterung mit VRMesh Studio, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (VRMESH STUDIO, Version 9.4.0)</i> .....  | 125 |
| <i>Tabelle 34: Filterung mit Trimble RealWorks, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3)</i> .....   | 126 |
| <i>Tabelle 35: Filterung mit Trimble RealWorks, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3)</i> .....   | 127 |
| <i>Tabelle 36: Gegenüberstellung Filterfunktionen mit Bewertung, niedrige Scaneinstellung, Eiche unbelaubt</i> .....   | 129 |
| <i>Tabelle 37: Fortsetzung Gegenüberstellung Filterfunktionen mit Bewertung, niedrige Scaneinstellung, Eiche unbelaubt</i> .....   | 130 |
| <i>Tabelle 38: Gegenüberstellung Filterfunktionen mit Bewertung, mittlere Scaneinstellung, Eiche belaubt</i> .....   | 131 |
| <i>Tabelle 39: Fortsetzung Gegenüberstellung Filterfunktionen mit Bewertung, mittlere Scaneinstellung, Eiche belaubt</i> .....   | 132 |
| <i>Tabelle 40: Vermaschung mit Faro Scene, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....   | 135 |
| <i>Tabelle 41: Vermaschung mit Faro Scene, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....   | 135 |
| <i>Tabelle 42: Vermaschung mit 3D-Reshaper, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)</i> .....   | 136 |
| <i>Tabelle 43: Vermaschung mit 3D-Reshaper, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)</i> .....   | 137 |
| <i>Tabelle 44: Vermaschung mit Geomagic Wrap, Eiche unbelaubt,</i>   |     |

|  |     |
|--|-----|
| <i>niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (GEOMAGIC WRAP, Version 2017)</i> .....   | 138 |
| <i>Tabelle 45: Vermaschung mit Geomagic Wrap, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (GEOMAGIC WRAP, Version 2017)</i> .....   | 138 |
| <i>Tabelle 46: Vermaschung mit CloudCompare, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (CLOUDCOMPARE Version V2.9beta)</i> .....  | 139 |
| <i>Tabelle 47: Vermaschung mit CloudCompare, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (CLOUDCOMPARE Version V2.9beta)</i> .....  | 139 |
| <i>Tabelle 48: Vermaschung mit VRMesh Studio, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (VRMESH STUDIO, Version 9.4.0)</i> .....  | 140 |
| <i>Tabelle 49: Vermaschung mit VRMesh Studio, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (VRMESH STUDIO, Version 9.4.0)</i> .....  | 140 |
| <i>Tabelle 50: Vermaschung mit Trimble RealWorks, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3)</i> .....   | 141 |
| <i>Tabelle 51: Vermaschung mit Trimble RealWorks, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3)</i> .....   | 142 |
| <i>Tabelle 52: Gegenüberstellung Vermaschung mit Bewertung, niedrige Scaneinstellung, Eiche unbelaubt</i> .....  | 143 |
| <i>Tabelle 53: Fortsetzung Gegenüberstellung Vermaschung mit Bewertung, niedrige Scaneinstellung, Eiche unbelaubt</i> .....  | 144 |
| <i>Tabelle 54: Gegenüberstellung Vermaschung mit Bewertung, hohe Scaneinstellung, Eiche belaubt</i> .....  | 145 |
| <i>Tabelle 55: Fortsetzung Gegenüberstellung Vermaschung mit Bewertung, hohe Scaneinstellung, Eiche belaubt</i> .....  | 146 |
| <i>Tabelle 56: Darstellung Programmkombination Faro Scene (Filterung) und 3D-Reshaper (Vermaschung), Eiche unbelaubt, niedrige Scaneinstellung (FARO SCENE, Version 6.2.4.30; 3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)</i> ..... | 148 |
| <i>Tabelle 57: Darstellung Programmkombination Faro Scene (Filterung) und 3D-Reshaper (Vermaschung), Eiche belaubt, mittlere Scaneinstellung (FARO SCENE, Version 6.2.4.30; 3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)</i> .....   | 149 |
| <i>Tabelle 58: .fls-Export in .rcp-Datei in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....  | 150 |
| <i>Tabelle 59: .rcp-Export in .rcs-Datei mit Autodesk ReCap (AUTODESK RECAP360, Version 4.2.0.2)</i> .....   | 152 |
| <i>Tabelle 60: Zeitaufwendungen Export in .obj-Datei in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....  | 155 |
| <i>Tabelle 61: Zeitaufwendungen Export in .obj-Datei in 3D-Reshaper (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)</i> .....  | 155 |
| <i>Tabelle 62: Eigenschaften der visualisierten Echtzeit-Baummodelle (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)</i> .....   | 161 |
| <i>Tabelle 63: Eigenschaften von Beispielobjekten aus computergenerierten Gehölzdatenbanken (AUTODESK MAX DESIGN, Version 2015; RENDERMALL GMBH 2012c; LAUBWERK GMBH 2011c)</i> .....                                      | 162 |
| <i>Tabelle 64: Eigenschaften eines visualisierten Echtzeit-Baummodells und eines computergenerierten aus einer Gehölzdatenbank (AUTODESK MAX DESIGN; RENDERMALL GMBH 2012c)</i> .....                                      | 164 |
| <i>Tabelle 65: Eigenschaften von Beispielobjekten aus computergenerierten Gehölzdatenbanken (AUTODESK MAX DESIGN, Version 2015;</i>  |     |



|  |     |
|--|-----|
| <i>LAUBWERK GMBH 2011c; xFrog 2017c)</i> .....   | 165 |
| <i>Tabelle 66: Eigenschaften von Beispielobjekten aus computergenerierten Gehölzdatenbanken (AUTODESK MAX DESIGN; MARLIN STUDIOS 2016b)</i> .....  | 166 |
| <i>Tabelle 67: Schnellübersicht Winteraufnahmen</i> .....  | 171 |
| <i>Tabelle 68: .fls-Direktimport Platane groß Winter, mittlere Scaneinstellung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....  | 172 |
| <i>Tabelle 69: .fls-Direktimport Platane klein Winter, mittlere Scaneinstellung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....   | 173 |
| <i>Tabelle 70: .fls-Direktimport Platane klein Winter, niedrige Scaneinstellung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....   | 174 |
| <i>Tabelle 71: Schnellübersicht über Eigenschaften der Punktwolkendarstellung Winteraufnahmen in Faro Scene</i> .....  | 174 |
| <i>Tabelle 72: Platane groß Winter, mittlere Scaneinstellung, Filterung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....   | 175 |
| <i>Tabelle 73: Platane klein Winter, mittlere Scaneinstellung, Filterung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....  | 176 |
| <i>Tabelle 74: Platane klein Winter, niedrige Scaneinstellung, Filterung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....  | 177 |
| <i>Tabelle 75: fls-Export in .rcp-Datei bei den Winteraufnahmen (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....   | 178 |
| <i>Tabelle 76: .rcp-Export in .rcs-Datei bei den Winteraufnahmen (AUTODESK RECAP360, Version 4.2.0.2)</i> .....  | 178 |
| <i>Tabelle 77: Punktwolkenvisualisierung Platane groß Winter, 1x gefiltert, mittlere Scaneinstellung in 3ds Max Design (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)</i> .....   | 179 |
| <i>Tabelle 78: Punktwolkenvisualisierung Platane klein Winter, links 1x gefiltert, mittlere Scaneinstellung, rechts 1x gefiltert, niedrige Scaneinstellung in 3ds Max Design (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)</i> ..... | 180 |
| <i>Tabelle 79: Schnellübersicht Sommeraufnahmen</i> .....  | 184 |
| <i>Tabelle 80: .fls-Direktimport Platane groß Sommer, mittlere Scaneinstellung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....  | 184 |
| <i>Tabelle 81: .fls-Direktimport Platane klein Sommer, mittlere Scaneinstellung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....   | 185 |
| <i>Tabelle 82: .fls-Direktimport Platane klein Sommer, niedrige Scaneinstellung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....   | 186 |
| <i>Tabelle 83: Schnellübersicht über Eigenschaften der Punktwolkendarstellung Sommeraufnahmen in Faro Scene</i> .....  | 186 |
| <i>Tabelle 84: fls-Export in .rcp-Datei bei den Sommeraufnahmen (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)</i> .....   | 187 |
| <i>Tabelle 85: .rcp-Export in .rcs-Datei bei den Sommeraufnahmen (AUTODESK RECAP360, Version 4.2.0.2)</i> .....  | 187 |
| <i>Tabelle 86: Punktwolkenvisualisierung Platane groß Sommer, ungefiltert, mittlere Scaneinstellung in 3ds Max Design (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)</i> .....  | 188 |
| <i>Tabelle 87: Punktwolkenvisualisierung Platane klein Sommer, links ungefiltert, mittlere Scaneinstellung, rechts ungefiltert, niedrige Scaneinstellung in 3ds Max Design (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)</i> .....   | 189 |

## Abkürzungsverzeichnis

|            |                                       |
|------------|---------------------------------------|
| 3D         | dreidimensional                       |
| Abb.       | Abbildung                             |
| ALS        | Airborne Laserscanning                |
| AR         | Augmented Reality                     |
| Aufl.      | Auflage                               |
| b          | Abstand der Basis                     |
| Bzw.       | Beziehungsweise                       |
| c          | Ausbreitungsgeschwindigkeit           |
| $C_0$      | Lichtgeschwindigkeit                  |
| ca.        | circa                                 |
| CAD        | Computer Aided Design                 |
| CCD        | Photodiode                            |
| CW (Laser) | Continuous wave                       |
| d          | Distanz                               |
| d.h.       | das heißt                             |
| DA         | Drittanbieter                         |
| Dr.        | Doktor                                |
| Engl.      | Englisch                              |
| erw.       | erweiterte                            |
| ET AL.     | et alii                               |
| etc.       | et cetera                             |
| f          | Modularfrequenz                       |
| f.(ff.)    | folgende, fortfolgende                |
| GB         | Gigabyte                              |
| GHz        | Gigahertz                             |
| GIS        | Geoinformationssystem                 |
| GmbH       | Gesellschaft mit beschränkter Haftung |
| GPS        | Global Positioning System             |
| h          | Stunden                               |
| HDR        | High Dynamic Range                    |
| hPa        | Hecto Pascal                          |
| Hrsg.      | Herausgeber                           |
| i.A.a      | in Anlehnung an                       |
| ICP        | Iterative Closest Point               |
| inc.       | Incorporated                          |
| XI         |                                       |

|          |   |
|----------|---|
| inkl.    | inklusive   |
| INS      | Initial Navigation System                               |
| LASER    | light amplification by stimulated emission of radiation |
| m/s      | Meter pro Sekunde                                       |
| MB       | Megabyte  |
| min      | Minuten   |
| Mio.     | Millionen   |
| MLS      | Mobile Laserscanning                                    |
| n        | Brechungsindex  |
| nm       | Nanometer   |
| o.J.     | ohne Jahresangabe                                       |
| o.M.     | ohne Monat  |
| o.S.     | ohne Seitenangabe                                       |
| p/s      | Punkte pro Sekunde                                      |
| Prof.    | Professor   |
| RAM      | Random Access Memory                                    |
| S.       | Seite   |
| sek      | Sekunden  |
| SY       | Systemanbieter  |
| t        | Laufzeit  |
| Tab.     | Tabelle   |
| tan      | Tangens   |
| TLS      | terrestrisches Laserscanning                            |
| u.       | und   |
| u.a.     | unter anderem   |
| überarb. | überarbeitete   |
| vgl.     | vergleiche  |
| VR       | Virtual Reality   |
| W-LAN    | Wireless Local Area Network                             |
| z.B      | zum Beispiel  |

**Symbolverzeichnis**

|           |                      |
|-----------|----------------------|
| $\gamma$  | Triangulationswinkel |
| $\lambda$ | Wellenlänge          |
| %         | Prozent              |
| ©         | Copyright            |
| &         | und                  |

## 1 Einleitung

Mit der Erfindung und Entwicklung des Computers wurde nicht nur eine Maschine bzw. ein Automat geschaffen, sondern eine „*Technologie, welche die Bedingungen bestimmter Kommunikationsformen verändert.*“ (RUTENFRANZ 1997, S.1). In Zeiten des 21. Jahrhunderts ist die Revolution des Computers so folgenreich, „*dass wir von einer neuen Epoche sprechen, in der wir leben: dem digitalen Zeitalter.*“ (DELVAUX DE FENFFE 2017). Stetig steigendes technisches Wissen, ständige Verbesserung von Methoden und Arbeitsabläufen und neue Technikprodukte sorgen für dauerhafte Produktivitätssteigerungen (POLLERT ET AL. 2016). Durch die rasanten Entwicklungen ergeben sich zunehmend digitale Trends, auf die auch Unternehmen sich einstellen müssen, um in einem wirtschaftlichen Umfeld erfolgreich zu bleiben. Einer der digitalen Trends ist das „*Leben in einer neuen Realität*“ (CSC 2008). Hier ist die Rede von einer computergenerierten Wirklichkeit in dreidimensionaler Darstellung, auch bekannt unter dem Begriff „Virtual Reality“, mit der Option, die Realität fiktiv zu erweitern („Augmented Reality“) (SPRINGER FACHMEDIEN WIESBADEN GMBH 2017). Eine Prognose der STATISTA GmbH (2017a) sagt voraus, dass die Anzahl der Virtual Reality-Nutzer weltweit von 2016 bis 2020 von 6,5 Millionen auf 24,4 Millionen steigen und sich somit mehr als verdreifachen wird.

Dieser Trend breitet sich auch zunehmend in der Bauwirtschaft aus, nachdem Laurin im Jahre 2001 (in ZEILE 2010, S.28) bereits Virtual Reality-Methoden als Werkzeug der Zukunft für die Darstellung neuer baulicher Situationen vorhergesagt hat. Virtuelle 3D-Abbildungen werden heute immer häufiger verwendet um Bauabläufe zu planen, virtuell zu testen und während der Umsetzung zu überwachen. Die „digitale Baustelle“ wird mittlerweile als Werkzeug und Methode für das Bauen im 21.Jahrhundert bezeichnet (BORRMANN U. GÜNTNER. 2011, S.2). Dieser Entwicklungstrend ist auf alle Branchen im Baubereich anwendbar und lässt sich auch im Bereich des Garten- und Landschaftsbaus etablieren. Statistiken haben gezeigt, dass sich Menschen immer mehr in ihrem Garten aufhalten. Sowohl im Jahr 2015 als auch 2016 und 2017 wurde in Deutschland als beliebteste Freizeitaktivität das Arbeiten im Garten angegeben (STATISTA GMBH 2017b). In einer anderen Umfrage geben 73% aller befragten Personen an, ihren Garten täglich zu Nutzen. Insgesamt 22 % verrichten täglich Gartenarbeit. Wiederum 51% geben an, mindestens einmal pro Woche im Garten zu arbeiten (STATISTA 2017c). Mit dem zunehmenden Aufenthalt im eigenen Garten steigt die Identifikation und Auseinandersetzung damit. Entscheidungen werden intensiver durchdacht und Alternativen in Betracht gezogen.

Verknüpft man den technischen Wandel im digitalen Zeitalter mit der Feststellung der zunehmenden Identifikation und dem Interesse am eigenen Garten, ergeben sich potentielle Ansätze für Virtual Reality-Technologien in der Branche des Garten- und Landschaftsbaus, die nicht nur den Bauablauf sondern auch den in der Anfangsphase laufenden Planungsprozess unterstützen können. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Entwicklungen und Potentiale von Virtual Reality-Methoden sowie den potentiellen Bezug zur Branche des Garten- und Landschaftsbaus.

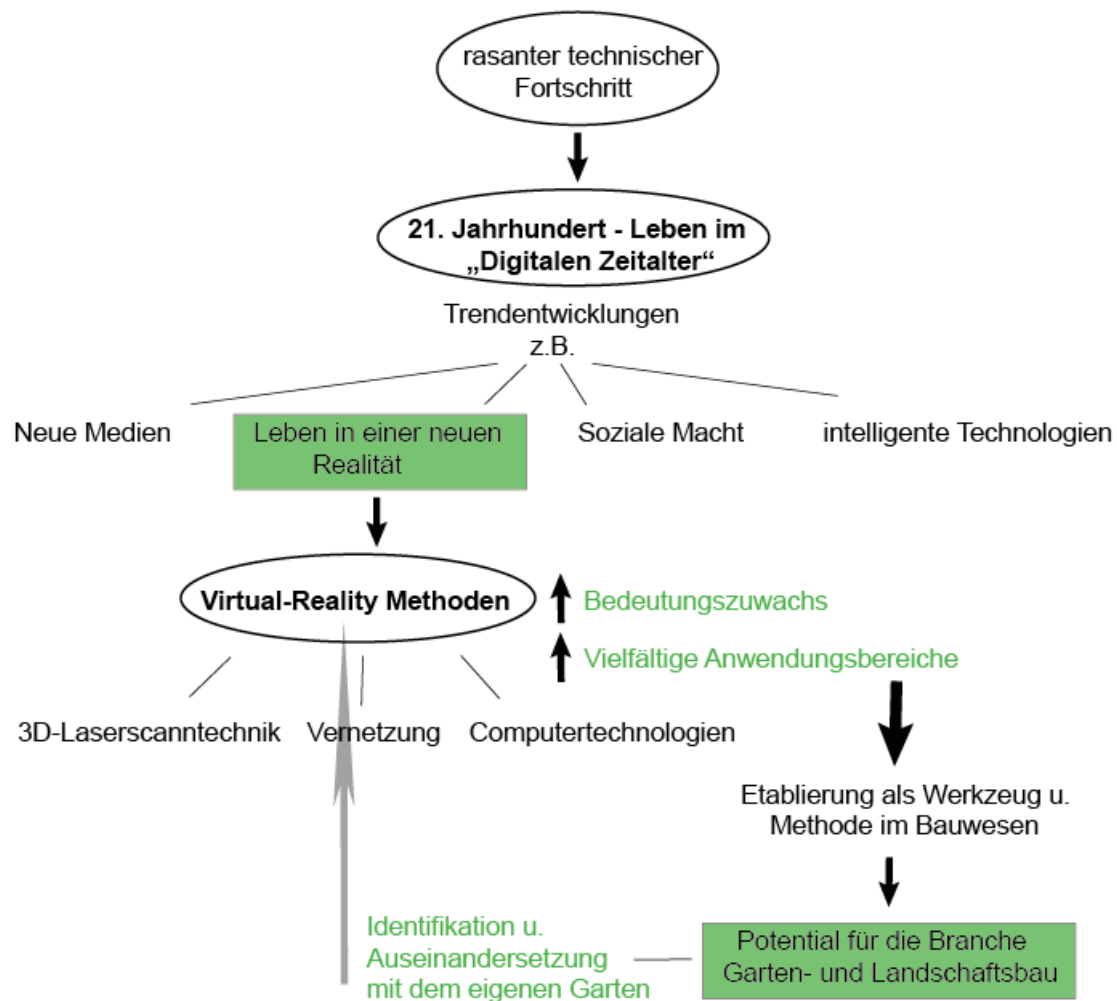


Abbildung 1: Überblick Einleitung in die Thematik (in Anlehnung an CSC 2008, STATISTA GMBH 2017a, STATISTA GMBH 2017c).

Hilfreich kann der Einsatz beispielsweise in der Darstellung späterer Geländemodellierungen und Visualisierung von geplanten Materialien und Produkten sein, in dem Echtzeitmodelle (z.B. Häuser) in visuelle Umgebungen (z.B. zeitlich simulierte Landschaftsentwicklungen) eingefügt werden. Als einer der wichtigsten Bestandteile eines jeden Gartens bzw. einer jeden Gartenplanung sind auch Gehölzdarstellungen zur räumlichen und optischen Darstellung grundlegend. Aus Interessensbekundung einer großen deutschen Baumschule befasst sich diese Masterarbeit mit den Möglichkeiten und Potentialen von Echtzeit 3D-Einzelbaummodellen, die auf Basis von

terrestrischen Laserscanaufnahmen entstehen. In diesem Zusammenhang werden auch die Weiterverarbeitung und Visualisierung der Aufnahmeergebnisse untersucht. Bäume sollen eins zu eins aus der Baumschule aufgenommen und virtuell in den eigenen Garten transformiert werden, um in der Planungsphase Vorstellungskräfte zu stärken, Dimensionen und Entwicklungen aufzuzeigen und Missverständnissen sowie Planungsfehlern vorzubeugen. Darauf aufbauend soll aus einer Vielzahl von Bäumen individuell der passende Baum für den eigenen Garten ausgewählt werden.

In der vorliegenden Masterarbeit werden nach der Erläuterung der Problemstellungen und Zielsetzungen zunächst Grundlagen über das 3D-Laserscanning und die 3D-Computervisualisierung erarbeitet. Anschließend folgt im 5. Kapitel die Vorstellung von Material und Methode bevor die ersten Probeaufnahmen und Programmuntersuchungen durchgeführt und vorgestellt werden. Nach der Festlegung der optimalen Scanparameter und Softwarelösungen werden die Hauptaufnahmen mit erzielten Ergebnissen dargestellt. Am Ende folgen eine Gesamtdiskussion, eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

## 2 Problemstellung

Bei der 3D-Laserscanaufnahme von Gehölzen und der anschließenden Weiterverarbeitung der generierten Punktwolken ergeben sich Problemstellungen, auf die nachfolgend eingegangen wird.

Für die Einzelbaumaufnahme mittels terrestrischem Laserscanning (TLS) existieren noch keine idealisierten Standardverfahren, die eine optimale Vorgehensweise zur Aufnahme und Weiterverarbeitung beschreiben. Dementsprechend gibt es keine konkreten Anhaltspunkte zu bestmöglichen Aufnahmequalitäten, Anforderungen an die Wiedererkennung, Aussagen über tatsächliche und vertretbare Arbeitsaufwände und das daraus resultierende Aufwands- und Ergebnisverhältnis. In der bisherigen Forschung und Literatur wird sich überwiegend mit der Aufnahme von regelmäßigen und geschlossenen Formen wie beispielsweise Gebäudefassaden oder Skulpturen auseinandergesetzt. Laserscanaufnahmen in Bezug auf Vegetationsflächen erfolgen zurzeit ausschließlich im Bereich der Forstwirtschaft. Hier werden Gehölzbestände großflächig mittels Luft- und Bodenaufnahmen zur Ermittlung von forstinventurbedingten Parametern aufgenommen und als abstrakte Linienmodelle dargestellt. Der Fokus liegt hierbei nicht auf einer realgetreuen Einzelbaumdarstellung.

Ein weiteres Problem besteht in der Vielzahl an auf dem Markt erhältlichen Geräte- und Softwareanbietern und den resultierenden unterschiedlichsten Datenformaten zur weiteren Bearbeitung der aufgenommenen Daten.

Bisher erfolgt die 3D-Gehölzvisualisierung auf der Basis von Datenbanken, die eine Vielzahl an visualisierten Gehölzen sowohl kostenfrei als auch entgeltlich bereitstellen. Ein wesentlicher Nachteil dieser 3D-Gehölzdatenbanken besteht darin, dass idealtypische, manuell konstruierte Gehölzmodelle oder parametergesteuerte Wachstumsgeneratoren verwendet werden. Tatsächlich existierende Gehölze werden somit nicht realgetreu wiedergespiegelt.

Weiterhin stellen umweltbedingte Parameter Einschränkungen im tatsächlichen Aufnahmeprozess dar. Hierzu zählen unter anderem Witterungseinflüsse (Wind, Regen, direkte Sonneneinstrahlung und Temperatur). Des Weiteren ist zu erwarten, dass der belaubte Zustand aufgrund der hohen Astverdeckung eine Komplettaufnahme des Einzelgehölzes erschwert. Abbildung 2 zeigt einen Gesamtüberblick.

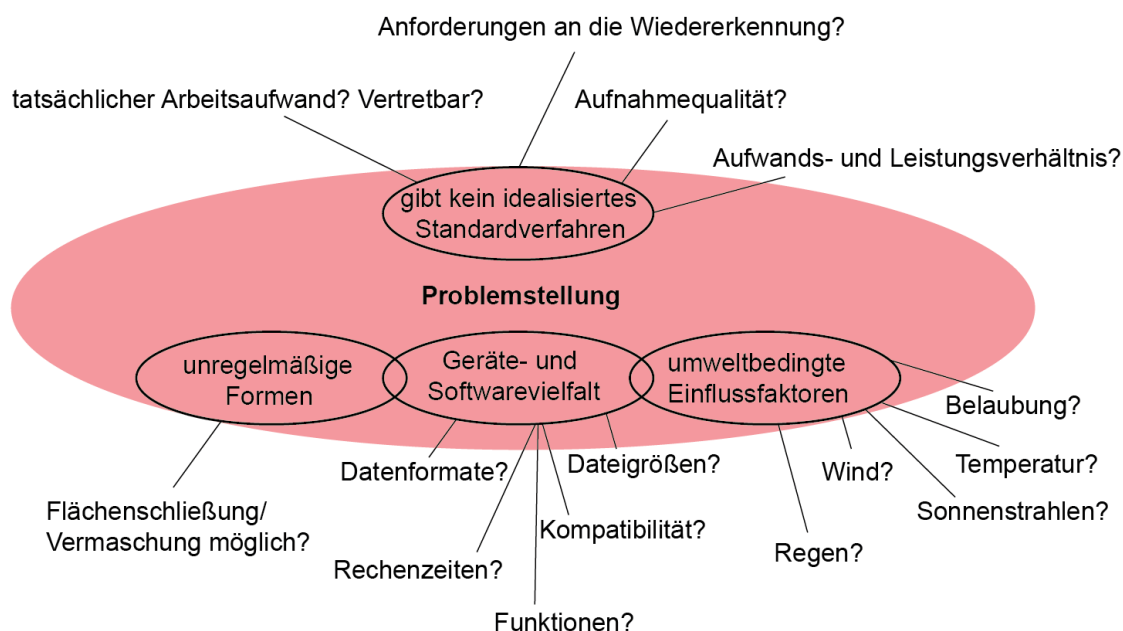


Abbildung 2: Übersicht der Problemstellungen innerhalb der Thematik

### 3 Zielstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, ein effizientes und standardisiertes Verfahren zur Aufnahme und realgetreuen Visualisierung von Einzelbäumen zu schaffen. Auf der Basis einer umfangreichen Grundlagenrecherche über den technischen Stand der 3D-Laserscantechnik und den aktuellen Stand über dreidimensionale Aufnahmen von Vegetationsflächen sollen Probeaufnahmen mit unterschiedlichen Scaneinstellungen und Aufnahmen verschiedener Gehölzgrößen in beiden Vegetationsperioden durchgeführt werden, um Möglichkeiten der Gehölzaufnahme mittels terrestrischem Laserscanning aufzuzeigen. Darauf aufbauend sollen zeitlich realistische und wirtschaftlich vertretbare Scaneinstellungen sowie Bearbeitungszeiten definiert werden. Weiterhin sollen Auswirkungen möglicher Einflussfaktoren wie die Unregelmäßigkeit von Baumformen, Wind- oder Lichteinflüsse untersucht und beschrieben werden.

Mithilfe eines selbst entwickelten Kriterienkataloges wird angestrebt, auf dem Markt verfügbare Weiterbearbeitungsprogramme speziell für Baum-Punktwolken auf Ihre Funktionen zu überprüfen und zu bewerten. Die optimale Laserscanaufnahme soll um eine bestmögliche Weiterbearbeitung und darauffolgende Visualisierung ergänzt werden. Für eine Nutzung in möglichst vielen Visualisierungsprogrammen soll ein geeignetes Austauschformat definiert werden.

Die Ergebnisse sollen am Ende in einer Gesamtdiskussion betrachtet und mit bestehenden Gehölzvisualisierungen aus Gehölzdatenbanken verglichen werden. Ebenfalls sollen in einem Ausblick weitere Potentiale zur Verwendung der erhobenen Daten aufgezeigt und Anreize für weitere Untersuchungen und Ansätze innerhalb der Thematik gegeben werden.

Zusammenfassend lassen sich unter dem Hauptziel der Entwicklung eines standardisierten Gesamtverfahrens zur Aufnahme und realgetreuen Visualisierung von Einzelbäumen stichpunktartig folgende Unterziele definieren:



- Festlegung von realistisch und wirtschaftlich geeigneten Scanparametern
- objektiver Vergleich und Bewertung von Weiterbearbeitungsprogrammen
- Festlegung eines geeigneten Austauschformates für möglichst viele Visualisierungsprogramme
- Aufzeigung und Untersuchung möglicher Problemstellungen während der Scanaufnahmen
- Beschreibung der jeweiligen Arbeitsschritte innerhalb der Weiterverarbeitungsprogramme
- Durchführung des Verfahrensablaufes anhand von 2 Gehölzen gleicher Gattung in unterschiedlichen Vegetationsperioden und Größen
- Aufzeigung von Schwächen und weiteren Untersuchungsansätzen

## **4 Grundlagen**

Bevor die dreidimensionalen Baumaufnahmen durchgeführt werden können ist es zunächst wichtig, einige Grundlagen über das 3D-Laserscanning und die 3D-Computervisualisierung zu erarbeiten.

### **4.1 3D-Laserscanning**

Das 3D-Laserscanning stellt ein mögliches Verfahren zur dreidimensionalen Aufnahme von Objekten dar. Zur detaillierten Aufarbeitung der Grundlagen wird in den nachfolgenden Unterkapiteln auf den aktuellen Stand der Technik, die Funktionsweise des terrestrischen Laserscannings, den Registrierungs- und Weiterverarbeitungsprozess der gewonnenen Aufnahmedaten und vorliegende Untersuchungen innerhalb der Thematik eingegangen.

#### **4.1.1 Stand der Technik**

##### **Verschiedene Vermessungsmethoden**

Im Anwendungsbereich des Vermessungswesens steht für die Objekterfassung eine Vielzahl an Vermessungsverfahren zur Verfügung. Um ein optimales Endergebnis zu erzeugen, ist die Wahl des richtigen Verfahrens bzw. die Kombination aus mehreren Verfahren von Nöten. Die Eignung der jeweiligen Verfahren hängt von der Form, Lage und Beschaffenheit des aufzunehmenden Objektes ab (WANGERIN 1992 in KERN 2003, S.6ff.). In der heutigen Zeit unterscheidet man zur dreidimensionalen Vermessung folgende relevante Verfahren:

- tachymetrisches Verfahren
- photogrammetrisches Verfahren
- Laserscanning (JOECKEL ET AL. 2008, S.318)

Im Zuge des tachymetrischen Verfahrens werden ausgewählte diskrete Punkte betrachtet und mit Hilfe von manuell angebrachten Reflektoren erfasst. Aus der Winkelmessung und der Distanzmessung werden polare Koordinaten gewonnen. Die Entfernungsmessung wird über einen Laser-Distanzmesser ausgeführt. Neuere Tachymeter können eine reflektorlose Distanzmessung realisieren und hierdurch eine flächenhafte Aufnahme gewährleisten. Allerdings ist der Systemaufbau eines Tachymeters für die diskrete Einzelpunktmessung ausgelegt und aufgrund der langsamen Messrate zur flächenhaften Erfassung nur bedingt geeignet (JOECKEL ET AL. 2008, S.318ff.).

Das Verfahren der Photogrammetrie bildet ein schnappschussartiges Aufnahmeverfahren, das von mehreren Standpunkten ausgeführt wird. Die gewonnenen Aufnahmen werden anschließend rechnergestützt im Postprocessing ausgewertet. Hierdurch lassen sich mit Hilfe der Grauwerte und Farbinformationen hauptsächlich Kanten extrahieren (JOECKEL ET AL. 2008, S.318). Durch die Photogrammetrie wird eine Methode der berührungslosen Erfassung geschaffen, wobei die Aufnahmen mit modernen Digitalkameras realisiert werden können. Für die Auswertung stehen preiswerte Programme auf dem Markt zur Verfügung. Ein deutlicher Nachteil der Photogrammetrie ist, dass zur klaren Kantenerfassung die aufzunehmenden Oberflächen an jeder benötigten Stelle abbildbare Strukturen und Einfärbungen aufweisen müssen. Weiterhin werden Tiefeninformationen der Objekte leicht vernachlässigt. Aus diesen Gründen ist auch dieses Verfahren für eine flächenhafte Erfassung nicht optimal geeignet (KERN 2003, S.11f.).

Mit Hilfe des Laserscannings werden flächenhafte 3D-Aufnahmen im Maßstab 1:1 mit einer Vielzahl von Messpunkten in kürzester Zeit generiert. Im Gegenzug zu herkömmlichen Vermessungsmethoden wird durch die Entwicklung des Laserscannings eine reflektorlose Methode geschaffen, bei der eine Oberfläche mit einer großen Punktdichte sehr schnell erfasst wird (KUTTERER 2007 in DOLD 2010, S.11). Das Endresultat dieser neuen Vermessungsmethode ist eine dreidimensionale Punktwolke. Hierdurch ergibt sich eine neue Methode für die geodätische Vermessung (KUTTERER 2007 in DOLD 2010, S.11). Das Laserscanning eignet sich besonders für komplexe und unregelmäßige Formen (BÖHLER ET AL. 2002, S.56). Gegenüber der Photogrammetrie oder Tachymetrie

werden beim Scannen keine diskreten Punkte gemessen, sondern es wird ein regelmäßiges Raster der Oberfläche erzeugt. Zusätzlich wird die Möglichkeit geboten, die dreidimensionalen Scanaufnahmen mit Fotoaufnahmen zu verbinden. Hierdurch können die Farbinformationen aus den Fotos auf die Punktwolke übertragen werden. Im Ergebnis kann die Punktwolke ohne großen Aufwand fotorealistisch dargestellt werden (NOTH 2012, S.4). BIENERT (2013, S.13) beschreibt das Verfahren als:

- „schnelle,
- digitalgenaue und hochauflösende,
- flächendeckende,
- objektive,
- in Echtzeit durchgeführte,
- mit hohem Dokumentationswert versehene

*Datenaufnahme [...].“*

Auf dem Markt sind verschiedene Hersteller von 3D-Scannern vertreten, die sich in Bauform und Verfahren zur Generierung der 3D-Koordinaten unterscheiden (DOLL 2011, S.3).

### **Geschichtliche Entwicklung des Laserscannings**

Die ersten Einsätze von Laserentfernungsmessungen fanden bereits in den 1960er Jahren im Bereich der Raumfahrt statt (BUFTON 1989 PFEIFER ET AL. 2007, S.1). Gegen Ende der 1990er Jahre wurden die ersten kommerziellen terrestrischen Laserscanner von den Firmen Cyra, Riegel und Zoller+Fröhlich angeboten (PFEIFER ET AL. 2007, S.1). Seit 1998 ist das terrestrische Laserscanning im Vermessungswesen präsent (JACOBS 2004, NIEBUHR 1998 in DOLD 2010, S.11). Im Laufe der Jahre ist dieses Vermessungsverfahren zu einer anerkannten und weit verbreiteten Messmethode gewachsen (DOLD 2010, S.11). Aufgrund der rasanten Entwicklung haben sich die Scanner in den Bereichen Messgenauigkeit, Messgeschwindigkeit, Zuverlässigkeit und Strombedarf zunehmend verbessert. Die Messgeschwindigkeit beispielsweise hat sich in den letzten 10 Jahren mehr als verzehnfacht (PFEIFER ET AL. 2007, S.1). Heutzutage wird das Laserscanning in vielen verschiedenen Anwendungsbereichen eingesetzt (DOLD 2010, S.19).

Zudem wird das Laserscanning durch instrumentelle und methodische Fortschritte attraktiver und es entsteht eine Vielfalt neuer Anwendungsmöglichkeiten (STAIGER & WUNDERLICH 2007 in LICHTENSTEIN 2011, S6).

### Anwendungsmethoden

Innerhalb des Laserscannings lassen sich drei unterschiedliche Anwendungsmethoden bzw. Plattformen unterscheiden. Zum einen das standortgebundene terrestrische Laserscanning und zum anderen die beiden mobilen Methoden der flugzeug- und fahrzeugbasierten Scannplattformen (BIENERT 2013, S.13f.). Die nachfolgende Grafik gibt einen Überblick hierzu.

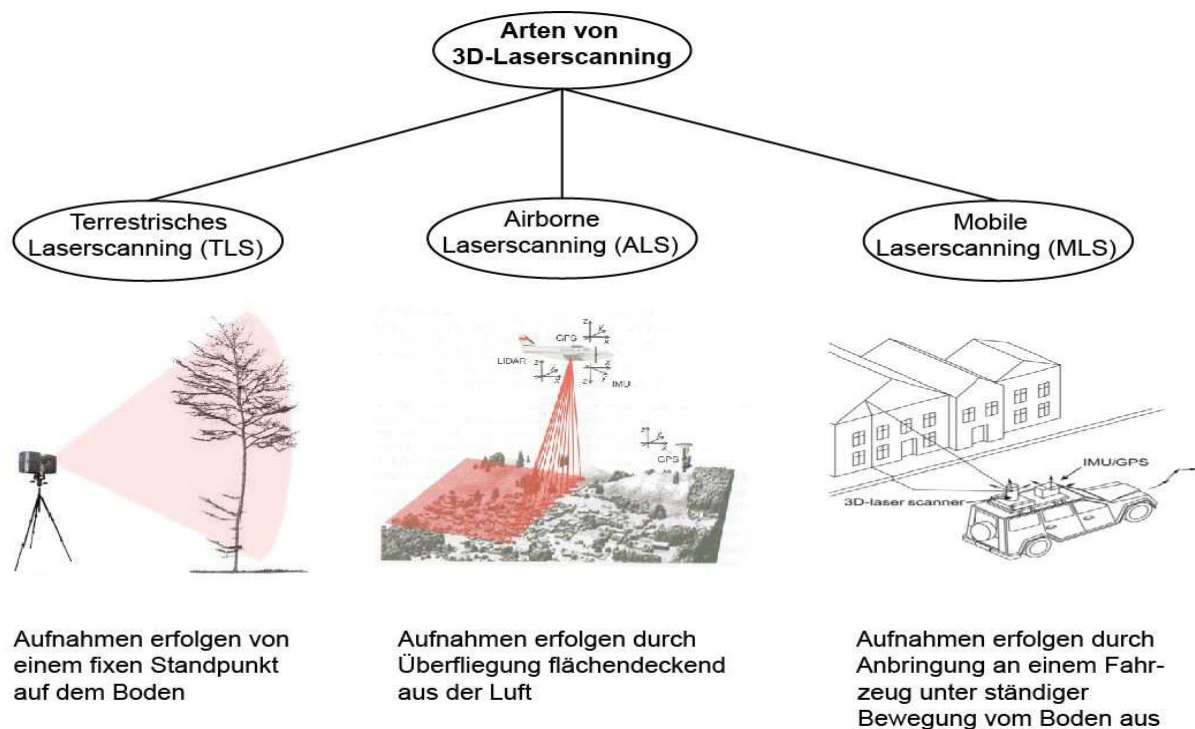


Abbildung 3 Arten von 3D-Laserscanning zusammengetragen nach PFEIFER ET AL. 2007, S1; BIENERT 2013, S.13f.; BERALLDIN ET AL. 2010 in BIENERT 2013, S.14; RIEGER ET AL. 2010 in BIENERT 2013, S.14; verändert nach DASSOT ET AL. 2010, S.209

Das terrestrische Laserscanning (TLS) zeichnet sich dadurch aus, dass die Aufnahmen von einem fixen Standpunkt ausgeführt werden (PFEIFER ET AL. 2007, S.1). Innerhalb der Forstwirtschaft bietet das terrestrische Laserscanning beispielsweise eine Ergänzung zu den gewonnenen Daten aus flugzeuggestütztem Laserscanning (ALS). Durch das TLS können die fehlenden bodennahen Informationen wie Stammdurchmesser oder Kronenansatzhöhe ergänzt werden (BIENERT 2013, S.13). „Ein großes Anwendungsgebiet des Flugzeuglaserscannings (engl. airborne laser scanning – ALS) ist in Bereichen der Forstwirtschaft und Forstwissenschaften zu finden.“ (MAAS 2005 in BIENERT

2013, S.13). Mittels einer Überfliegung wird ein flächendeckendes Gelände- und Kronenmodell erfasst. Aus den Aufnahmen lassen sich anschließend die Baumhöhen ermitteln. Mit Hilfe von Positions- und Orientierungsmessungen kann das sich in Bewegung befindende ALS-System Oberflächen aus der Luft erfassen, wobei die Positionsbestimmung mittels Satellitenpositionierungssystem wie z.B. GPS und mittels Navigationssysteme (INS) erfolgt (BIENERT 2013, S.13f.). Vorteilhaft zur Vegetationserkundung ist das Aufnahmeverfahren der Full-Waveform-Digitalisation. Dieses Verfahren ist in modernen Flugzeugscannerinstrumenten zu finden. Hierbei wird ein Mehrfachecho des Lasersignales in Abhängigkeit zur Zeit aufgezeichnet. Damit werden nicht nur Informationen vom ersten oder letzten Laserimpuls aufgezeichnet (siehe 4.1.2), sondern zusätzlich Informationen über die passierten Hindernisse. Auf diese Weise werden um das Dreifache mehr an Punkten erfasst. Weiterhin reichen diese Punkte bis zum Boden und zeichnen nicht nur die Geländeoberfläche auf (REITBERGER ET AL. 2008 in BIENERT 2013, S.23f.).

Die Abkürzung MLS steht im englischen für „mobile laser scanning“. Diese Plattform bietet eine fahrzeuggestützte Methode, bei der der Scanner in Bewegung ist. Deshalb ist auch hier eine Positions- und Orientierungsmessung notwendig (BIENERT 2013, S.14). Als Trägerfahrzeuge für das MLS kommen sowohl Kraftfahrzeuge (RUTZINGER ET AL. 2010 in BIENERT 2013, S.18), Schienenfahrzeuge (METTENLEITER ET AL. 2008 in BIENERT 2013, S.18), Schiffe (RIEGER ET AL. 2008 in BIENERT 2013, S.18) als auch autonome Roboter (ZIEGLER ET AL. 2010 in BIENERT 2013, S.18) zum Einsatz.

Der Vorteil der mobilen Systeme (ALS und MLS) gegenüber des standortgebundenen Systems (TLS) besteht in der Registrierung. Beim ALS und MLS müssen aufgrund der Positionsbestimmung keine Passpunkte und Überlappungen der einzelnen Standorte vorgesehen werden, was den Arbeitsschritt der Registrierung hinfällig macht (DOLD 2010, S.20).

### **Zunehmende Bedeutung durch die Vielzahl an Anwendungsbereichen**

Auf dem Gebiet des terrestrischen Laserscannings hat sich eine Vielzahl an Anwendungsbereichen etabliert. Die Entwicklung der Laserscanner ist bei manchen Herstellern bereits bis zur vierten Generation fortgeschritten, wodurch die Systeme robuster, schneller, genauer, leichter und günstiger geworden sind. Weiterhin hat sich die Bedienung der Geräte verbessert, sodass der Scanvorgang auch durch nicht geschultes Personal leicht per Knopfdruck gestartet werden kann (KERSTEN ET AL. 2008, S.31). Die Bedeutung und Entwicklung des Laserscannings nimmt immer mehr zu, was dazu führt, dass dieses Verfahren, sowohl im Bereich der Technik als auch der Software, noch großen Veränderungen unterliegt (PLANK ET AL. 2011, S.49).

Im Jahr 2002 war die Anwendung von 3D-Scannern zunächst hauptsächlich in der Großindustrie verbreitet und bei anderen Anwendungsbereichen wie Architektur, Denkmalpflege und Archäologie noch relativ zurückhaltend (BÖHLER ET AL. 2002, S.6). Auf dem Gebiet der Geodäsie und Geoinformatik ist das terrestrische Laserscanning in der Zwischenzeit zu einem Standardwerkzeug herangewachsen (PFEIFER ET AL. 2007, S.1). Das Anwendungsgebiet reicht in den jeweiligen Bereichen von den Projektphasen der Planung, Montage und Instandhaltung bis hin zum Betrieb von Objekten, wie zum Beispiel in der Deformationsanalyse oder Bauwerksüberwachung (ELING 2009 in LICHTENSTEIN 2011, S.3). LINDSTAEDT ET AL. (2012, o.S.) erweitert im Jahr 2012 die Anwendungsgebiete um den Bereich der topographischen Aufnahmen im Schiffsbau und in der Forensik. Durch BIENERT (2013, S.13) wurden die Bereiche Facility Management, Medizin und Forstwirtschaft ergänzt. In DOLD (2010, S.7) wird der Anwendungsbereich der Erstellung von Visualisierungen und Animationen aufgeführt. Weitere Anwendungsgebiete für die dreidimensionale Erfassung mittels TLS werden durch die nach der Aufnahme folgende Abschätzung von Biomasse geschaffen (LINDENBERGH & PIETRZYK in WUJANZ ET AL. 2017, S.1). Aufgrund der großen Produktvielfalt und der Vielzahl an Anwendungsgebieten stehen die Hard- und Softwareprodukte des terrestrischen Laserscannings unter einem großen Konkurrenzdruck (NOTH 2012, S.87).

### Auszug aus dem heutigen Stand der Produktvielfalt

In den unten aufgeführten Tabellen wird ein Auszug der zurzeit gängigen und verfügbaren Scanner aufgeführt.

**Tabelle 1: 3D-Laserscanner** (ZOLLER + FRÖHLICH GmbH 2017 a), (ZOLLER + FRÖHLICH GmbH 2017 b), (RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GmbH 2017), (¹ p/s = Punkte pro Sekunde)

|                 |   |   |
|-----------------|---|---|
| Scanner:        | Z+F IMAGER® 5010X   | VZ-6000   |
|                 |  |  |
| Hersteller:     | Zoller + Fröhlich   | RIEGL   |
| Messverfahren:  | Phasenvergleichsverfahren   | Impulslaufzeitverfahren   |
| Bauform:        | Panoramascanner   | Hybridscanner   |
| Reichweite:     | 187 m   | 6.000 m   |
| Messrate:       | max. 1.016.000 p/s¹   | 222.000 p/s¹  |
| Genauigkeit:    | < 1 mm  | 15 mm   |
| Gewicht:        | 11,00 kg inkl. Batterie   | 14,50 kg inkl. Batterie   |
| Zusatzfunktion: | GPS, HDR-Kamera   | GPS, Kamera   |

**Tabelle 2: 3D-Laserscanner** (MENSI o.J.; FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. 2017; TRIMBLE INC. 2017a) (¹ p/s Punkte pro Sekunde)

|                |   |   |
|----------------|---|---|
| Scanner:       | GS 25   | TX8   |
|                |  |  |
| Hersteller:    | Mensi   | Trimble   |
| Messverfahren: | Triangulationsverfahren   | Impulslaufzeitverfahren   |



|                 |                           |                            |
|-----------------|---------------------------|----------------------------|
| Bauform:        | Kamerascanner             | Panoramascanner            |
| Reichweite:     | 25 m                      | 120 m                      |
| Messrate:       | max. 100 p/s <sup>1</sup> | 1.000.000 p/s <sup>1</sup> |
| Genauigkeit:    | 0,6 mm                    | <2 mm                      |
| Gewicht:        | 15,00 kg inkl. Batterie   | 11,20 kg inkl. Batterie    |
| Zusatzfunktion: | Kamera                    | HDR Kamera                 |

Tabelle 3: 3D-Laserscanner (FARO EUROPE GmbH & Co. KG 2016; LEICA GEOSYSTEMS AG – Part of Hexagon 2017a), (<sup>1</sup> p/s = Punkte pro Sekunde)

|                 |  |   |
|-----------------|--|---|
| Scanner:        | Focus <sup>s</sup> 350   | P30/P40   |
|                 |  |  |
| Hersteller:     | Faro   | Leica   |
| Messverfahren:  | Phasenvergleichsverfahren  | Impulslaufzeitverfahren & Wave Form   |
| Bauform:        | Panoramascanner  | Panoramascanner   |
| Reichweite:     | 350 m  | 270 m   |
| Messrate:       | max. 976.000 p/s <sup>1</sup>  | 1.000.000 p/s <sup>1</sup>  |
| Genauigkeit:    | +/- 1 mm   | 1,2 mm  |
| Gewicht:        | 4,20 kg inkl. Batterie   | 12,65 kg inkl. Batterie   |
| Zusatzfunktion: | GPS, HDR-Kamera  | HDR Kamera  |

Die in Tabelle 1 bis Tabelle 3 dargestellten Scanner unterscheiden sich hinsichtlich Messverfahren, Bauform, Reichweite und Messweite zum Teil enorm. Hieraus geht hervor, dass die jeweiligen Scanner auf ihr Anwendungsgebiet abzustimmen sind. In BÖHLER ET AL. (2002, S.8ff.) werden Insgesamt 49 verschiedene Scanner und Hersteller aufgeführt. Dies belegt die Produktvielfalt der verschiedenen Geräte und Hersteller, die auf dem Markt zur Verfügung stehen.



### 4.1.2 Funktionsweise des terrestrischen Laserscannings

Zum Verständnis der Funktionsweise eines terrestrischen Laserscanners sind die physikalischen Eigenschaften eines Lasers, die unterschiedlichen Verfahren zur Distanzmessung und die Einteilung der Scanner in unterschiedliche Aufnahmebereiche und Bauformen wichtig. Daraus ableitend sind mögliche Fehlerquellen während des Messvorganges und Aspekte der Standpunktplanung grundlegend.

#### Physikalische Eigenschaften des Lasers

Die Abkürzung Laser steht für die englische Bezeichnung „*light amplification by stimulated emission of radiation*“, was übersetzt „*Licht-Verstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung*“ bedeutet (DOBRINSKI ET AL. 2010, S.536). Der Grundstein für das Laserprinzip wurde um das Jahr 1905 durch Albert Einstein gelegt, bevor T. Maiman in den 1960er Jahren den ersten Laser entwickelte (EICHLER U. EICHLER 2015, S.53). Durch die Entwicklung verschiedener Lasermaterialien wurden zielführende Strahlungsquellen wie zum Beispiel Gaslaser, Festkörperlaser und Halbleiterlaser geschaffen (EICHLER U. EICHLER 2015, S.1). Die Laserstrahlung, die sich in Form eines energiereichen Lichtbündels darstellt, entsteht durch die Energiezufuhr auf das Lasermaterial (vgl. Abbildung 4). Bei einem Gaslaser besteht das Lasermaterial beispielsweise aus einem Helium-Neon Laser und

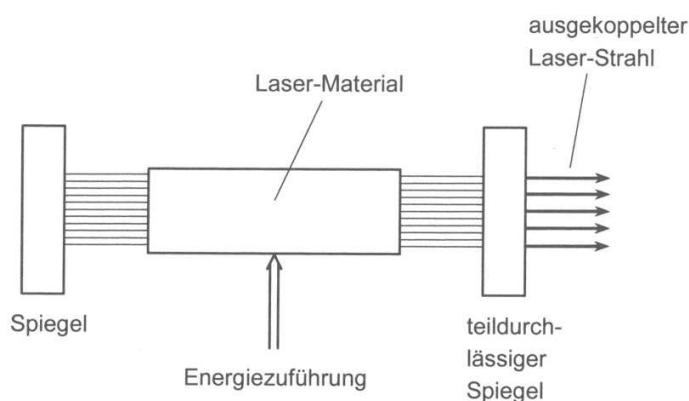


Abbildung 4: Laserentstehung (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.16)

Im Fall eines Halbleiterlasers kommt ein Galliumarsenid-Material zum Einsatz (JOECKEL ET AL. 2008, S.16). Sogenannte Ho-Laser mit einem Holmium-Festkörper finden ihren Einsatz bei Entfernungsmessungen und in der Medizin, da diese Strahlenquelle ungefährlich für das menschliche Auge ist (EICHLER U. EICHLER 2015, S.153).

Zur elektronischen Streckenmessung wird das Prinzip der elektrooptischen Distanzmessung verwendet. Hierbei wird ein stark gebündelter Laserstrahl von einer Laserdiode ausgestrahlt und am aufzunehmenden Objekt reflektiert. Daraufhin wird der zurückgeworfene Laserstrahl am Messinstrument über eine Photodiode aufgefangen und ausgewertet (SCHNEIDER 2008, S.55f.; WAGNER ET AL 2003 in GRAFL 2012, S.3). Mit Hilfe der Laufzeit zwischen dem Aussenden und Empfangen eines Impulses

wird die Entfernung zwischen Messinstrument und Objekt bestimmt (WAGNER ET AL 2003 in GRAFL 2012, S.3; PFEIFER ET AL. 2007, S.1). Die Grundlage zur Bestimmung der Entfernung zwischen Messinstrument und Objekt beruht auf der Kenntnis über die Verbreitungsgeschwindigkeit von Licht im Vakuum (KRAUS 2004 in GRAFL 2012, S.3). Die Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  beträgt im Vakuum  $2,998 \cdot 10^8$  m/s (EICHLER U. EICHLER 2015, S.2). Über den Faktor des Brechungsindex  $n$  (atmosphärische Brechzahl) lässt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit oder auch Signalgeschwindigkeit  $c$  bestimmen. Mit Hilfe der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c = \frac{c_0}{n}$  und der Berücksichtigung der Zeit kann die Strecke zwischen Messinstrument und Objekt ermittelt werden. (EICHLER U. EICHLER 2015, S.221; JOECKEL ET AL. 2008, S.18). Bei der elektronischen Streckenmessung unterscheidet man generell in drei verschiedenen Verfahren zur Distanzermittlung:

1. Impulslaufzeitverfahren
2. Phasenvergleichsverfahren
3. Triangulationsmessverfahren (JOECKEL ET AL. 2008, S.332; BIENERT 2013, S.22; SCHNEIDER 2008, S.56; DOLD 2010, S.14ff.)

### **Impulslaufzeitverfahren**

Grundlage für das Impulslaufzeitverfahren ist die Messung der Laufzeit (im Englischen „time of light“) eines Laserimpulses (SCHNEIDER 2008, S.56). Hierbei wird ein stark gebündelter Laserimpuls mit schnellem Intervall (Pulsed Laser) auf ein Ziel gerichtet und dort reflektiert (WAGNER ET AL. 2003 in GRAFL 2012, S.3). Diese Reflexion wird über eine Empfangseinheit aufgenommen, in der die Laufzeit mittels einem elektronischen Zähler erfasst wird. Sobald der Laserstrahl ausgesendet wird, startet der Zähler mit der Laufzeitaufzeichnung und stoppt diese, wenn der Laserimpuls vom reflektierten Objekt zurückkehrt (JOECKEL ET AL. 2008, S.19). In der nachfolgenden Abbildung wird die Funktionsweise des Impulslaufzeitverfahrens verdeutlicht.

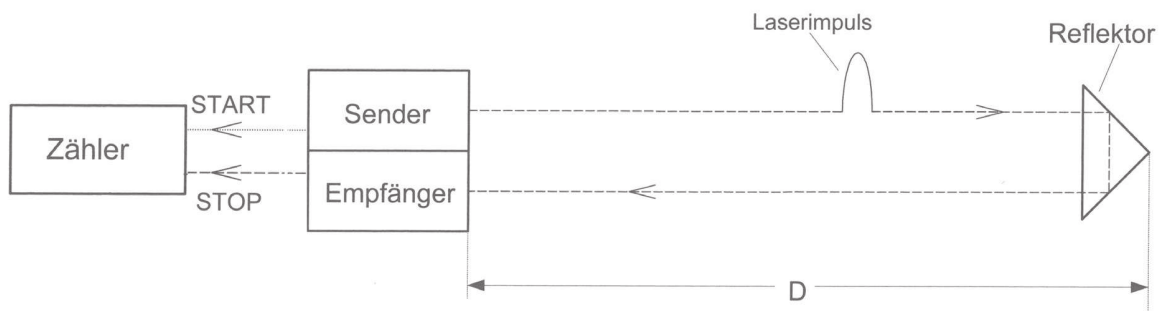


Abbildung 5: Funktionsweise Impulslaufzeitverfahren mit Zählereinheit  
(Verändert nach JOECKEL ET AL. 2008, S.18 u. 19)

Über die Laufzeit des Lasers und die Geschwindigkeit des Lichtes wird die Entfernung berechnet. Aus der Laufzeit und der Ausbreitungsgeschwindigkeit lässt sich die Entfernung nach der Formel  $d = \frac{c \cdot t}{2}$  berechnen, wobei d die Distanz und t die Laufzeit beschreibt. Der Faktor c beschreibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lasers und wird nach der zuvor aufgeführten Formel  $c = \frac{c_0}{n}$  berechnet (WITTE U. SPARLA 2015, S.172f.; JOECKEL ET AL. 2008, S.18). Die Brechzahl n spiegelt die Beeinträchtigung der Lichtgeschwindigkeit durch Luftdruck, Lufttemperatur, Dampfdruck und Wellenlänge wieder. Somit ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laser abhängig von der Wellenlänge des verwendeten Lasers sowie von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck (SCHNEIDER 2008, S.56). Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist abhängig davon, wie Genau die Laufzeit bestimmt wird. Innerhalb eines Messvorganges darf der nachfolgende Laserimpuls erst ausgesendet werden, wenn der vorherige bereits registriert wurde (DOLD 2010, S.15). Bei einer Entfernung von 1.000 m wird mit dem Impulslaufzeitverfahren eine Messgenauigkeit von 6 bis 20 mm erreicht (SCHNEIDER 2008, S.56). Aufgrund der großen Reichweite ist das Impulslaufzeitverfahren das Standardverfahren bei flugzeuggestützten Messungen (BIENERT 2013, S.22).

Vorteile dieses Verfahrens sind:

- eine schnelle Streckenmessung mit hoher Auflösung (TAUBER 2005, S.15)
- Erzielung großer Reichweiten bis zu 2.000 m (DOLD 2010, S.15)
- eine eindeutige Streckenmessung in kurzer Zeit (JOECKEL ET AL. 2008, S.24)
- keine systematisch auftretenden Fehler (JOECKEL ET AL. 2008, S.24)

Nachteile ergeben sich durch:

- einen großen Aufwand im Verhältnis zur Genauigkeit (TAUBER 2005, S.15)
- geringere Datenraten (50.000 Punkte pro Sekunde) (SCHNEIDER 2008, S.56)
- längere Scanzeiten (SCHNEIDER 2008, S.56)
- eine aus Sicherheitsgründen begrenzte maximale Bündelung des Laserlichtes (JOECKEL ET AL. 2008, S.24)
- einen hohen technischen Aufwand zur Erfassung der atmosphärischen Einflüsse (JOECKEL ET AL. 2008, S.24)

### Phasenvergleichsverfahren

Anders als beim Impulslaufzeitverfahren wird beim Phasenvergleichsverfahren ein kontinuierliches Wellensignal mit bekannter aber unterschiedlicher Wellenlänge ausgestrahlt, welches die Distanzermittlung durch einen Vergleich der Phasenlänge von ausgesendeten und empfangenen Signalen realisiert (SCHNEIDER 2008, S.57; WEHR 2005 in DOLD 2010, S.16; PRZYBLILA 2012 in NOTH 2012, S.7; PFEIFER ET AL. 2007, S.1). Die Entfernung wird über eine Modulations- und Trägerwelle bestimmt. Hierbei weist die Trägerwelle ein kurzwelliges Signal und die Modulationswelle ein langwelliges Signal auf (BIENERT 2013, S.22). Durch ein Vielfaches der Phasen addiert mit den Phasenreststücken, welche am Empfänger registriert werden, lässt sich die Distanz bestimmen (vgl. Abbildung 6) (BIENERT 2013, S.22).

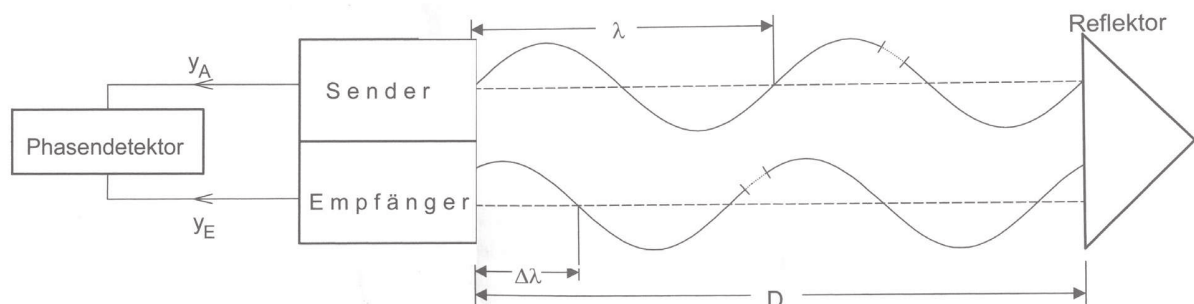


Abbildung 6: Funktionsweise Phasenvergleichsverfahren mit Phasendetektor  
(Verändert nach JOECKEL ET AL. 2008, S.37 u. 38)

Zur millimetergenauen Distanzermittlung sowie zur Unterscheidung der Wellenreststücke und der Modulationswellen wird die Messung in zwei Abschnitte mit unterschiedlichen Frequenzen eingeteilt:

1. Grobmessung (große Maßstabswellenlänge)
2. Feinmessung (kleine Maßstabswellenlänge) (JOECKEL ET AL. 2008, S.39f.; PRZYBLILA 2012 in NOTH 2012, S.7)

Den ausgesendeten Trägerwellen werden sinusförmige Signale aufmoduliert. Diese aufmodulierten Wellen dienen als Maßeinheit für die Streckenmessung. Mit Hilfe der oben erläuterten Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  und der fest definierten Modulationsfrequenz  $f$  lässt sich die Wellenlänge  $\lambda$  mit der Gleichung  $\lambda = \frac{c}{f}$  bestimmen (JOECKEL ET AL. 2008, S.39f.). Unter Verwendung der Wellenlänge lässt sich die Distanz mit  $D = N * \frac{\lambda}{2} + \frac{\Delta\lambda}{2}$  errechnen, wobei  $\Delta\lambda$  das Wellenreststück beschreibt und  $N$  ein Vielfaches der ganzen Modulationswellen ausdrückt. Die Variablen  $\lambda$  und  $N$  werden mit Hilfe eines Phasendetektors ermittelt (vgl. Abbildung 6). Zur Ermittlung der Phasen gibt es verschiedene Methoden (JOECKEL ET AL. 2008, S.37f.):

- „die analoge Phasenmessung
- die Phasenmessung mit variabler Modulationsfrequenz
- die digitale Phasenmessung und
- die Phasenmessung aus Intensitätsmessungen“ (JOECKEL ET AL. 2008, S.39).

Mit dem Messverfahren wird eine Genauigkeit von wenigen Millimetern erreicht. Auf 50 m Entfernung erreicht der Laser eine Spotgröße von ca. 1 cm (JOECKEL ET AL. 2008, S.332.).

Die Vorteile des Verfahrens sind:

- eine starke Entwicklung und damit verbundene kompakte und kostengünstige Messmethode (JOECKEL ET AL. 2008, S.40f.)
- keine Verfahrensbeeinflussungen durch kurzzeitige Unterbrechungen der Messstrahlen (JOECKEL ET AL. 2008, S.40f.)
- hohe Datenraten (BIENERT 2013, S.22; SCHNEIDER 2008, S.57) bis zu 1 Millionen Punkte pro Sekunde bei der Aufnahme (NOTH 2012, S.7)
- eine hohe Genauigkeit von 2 bis 8 mm (SCHNEIDER 2008, S.57)
- kurze Messzeiten vor Ort (SCHNEIDER 2008, S.57; NOTH 2012, S.7)
- eine schnelle und wirtschaftliche Punkterfassung (NOTH 2012, S.7)

Nachteile ergeben sich durch:

- das Auftreten von systematischen Fehlern (JOECKEL ET AL. 2008, S.40f.)
- eine nicht realisierbare eindeutige Streckenmessung mit nur einer Maßstabswellenlänge und hoher Genauigkeit (JOECKEL ET AL. 2008, S.40f.)
- die Notwendigkeit einer aufwendigeren Optik (JOECKEL ET AL. 2008, S.40f.)
- eine benötigte leistungsfähigere Stromversorgung gegenüber den anderen Verfahren (JOECKEL ET AL. 2008, S.40f.)
- eine geringe Reichweite von maximal 80-100 m (BIENERT 2013, S.22; SCHNEIDER 2008, S.57; DOLD 2010, S.16; NOTH 2012, S.7)

### Triangulationsverfahren

Ähnlich wie beim Phasenvergleichsverfahren wird beim Triangulationsverfahren der Laserstrahl kontinuierlich auf das Objekt geleitet (BIENERT 2013, S.23) und von dort aus reflektiert. Mittels Optik und positionsempfindlicher Photodiode wird der zurückgeworfene Laserstrahl wieder aufgenommen (SCHNEIDER 2008, S.57). Mit Hilfe des Senders und Empfängers (positionsempfindlicher Lichtsensor), welche fest über eine definierte Basis miteinander verbunden sind, wird die Entfernung zwischen Sender und Objekt bestimmt. Über das Dreieck, bestehend aus Sender, Objekt (Reflektor) und Empfänger, wird die Distanz berechnet. (DOLD 2010, S.14). „Das Messprinzip beruht auf den einfachen trigonometrischen Zusammenhängen im rechtwinkligen Dreieck“ (JOECKEL ET AL. 2008, S.41f.). Sobald im Empfänger eine bestimmte Position registriert wird, kann das Dreieck aus Sender, Objekt und Empfänger rekonstruiert werden und damit die Entfernung zum Objekt ermittelt werden (SCHNEIDER 2008, S.57). Auf Grundlage des bekannten Triangulationswinkel  $\gamma$  und dem Abstand der Basis  $b$  (Abstand zwischen Laser und Photodiode) wird die Distanz nach der Formel  $D = \frac{b}{\tan(\gamma + \Delta\gamma)}$  ermittelt, wobei die Variable  $\Delta\gamma$  die Winkeländerung beschreibt. Fällt der Laserpunkt nicht genau mittig auf die Photodiode des Empfängers, kann hierüber die Winkeländerung bestimmt werden. Die Länge des Empfängers oder CCD-Sensors legt den Messbereich fest. Das Triangulationsverfahren eignet sich für den Nahbereich und wird meist bei handgeführten Scannern eingesetzt (JOECKEL ET AL. 2008, S.41f.) Weiterhin ist das Triangulationsverfahren auch unter dem Namen Laserlichtverfahren bekannt. Es eignet sich vorrangig für kleinvolumige Körper im Bereich der Medizin und Industrie (BIENERT 2013, S.23). Abbildung 7 verdeutlicht die Funktionsweise.

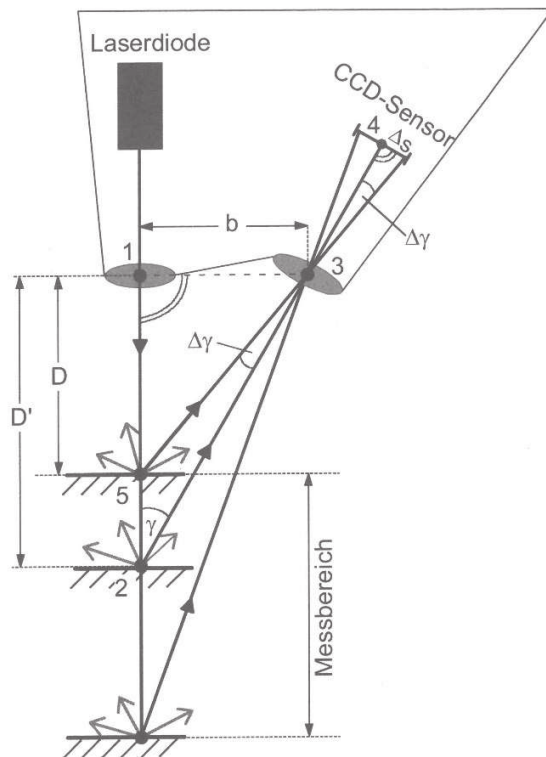


Abbildung 7: Funktionsweise Triangulationsverfahren (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.41)

Der Vorteil des Verfahrens ist die Genauigkeit im Submillimeterbereich (DOLD 2010, S.14)

Nachteile ergeben sich durch:

- eine geringe Reichweite mit Entfernungen bis max. 10 m (SCHNEIDER 2008, S.57)
- eine eingeschränkte Nutzung bei Tageslicht, da hier eine eindeutige Reflexion am Objekt nicht möglich ist (MARBS 2003, S.2f.)

### Aufnahmebereich bzw. Messraum

Die Einteilung der Scanner in die jeweils geeigneten Messräume bzw. Aufnahmebereiche ergibt sich aus den zuvor genannten Distanzmessverfahren. Grundlage hierfür ist die Reichweite und der Aufnahmebereich der Messverfahren (JOECKEL ET AL. 2008, S.324). Der Messraum teilt sich in folgende Bereiche ein:

- „- Nahebereich 0-4 m: Medizin, Industrie, Mode
- Mittlere Reichweite 3-50 m: Industrie- und Ingenieursvermessung, Bauvermessung, Facility Management, Reverse Engineering
- Große Reichweite 50-500 m: Vermessung im Zusammenhang mit Naturgefahren und der Sicherung von Kulturerbe“ (INGENSAND 2004 in JOECKEL ET AL. 2008, S.324.)

### Ablenkeinheit und Scannerbauform

Um das beim TLS wünschenswerte Erfassen von dreidimensionalen Koordinaten zu ermöglichen, müssen die Laserstrahlen der beschriebenen Verfahren dreidimensional im Raum verteilt werden. Durch diese Verteilung werden die Oberflächen zeilen- oder rasterartig erfasst (PLANK ET AL. 2011, S.43). Dies wird ähnlich wie bei einem Tachymeter mit einem Mechanismus aus rotierenden Spiegeln und Drehachsen innerhalb der sogenannten Ablenkeinheit gewährleistet (DOLD 2010, S.14f.). ZOGG U. SCHULZ (2006, S.421) beschreiben die Ablenkung durch Spiegelsysteme mit Kippbewegungen als oszillierend und die durch Drehbewegung als rotierend. Sobald der Laserstrahl auf den Spiegel trifft wird dieser abgelenkt. Die Ablenkung ist vom Winkel abhängig, den der Strahl zum Spiegel aufweist. In dem Moment in dem sich der Winkel des Spiegels ändert, verändert sich die Richtung des Laserstrahls. Durch die kontinuierliche Rotation der Spiegel wird der Laserstrahl dauerhaft abgelenkt, wodurch eine Scanzeile entsteht. (KNEUBÜHL, SIGRIST 1995 in TAUBER 2005, S.S12). Der Unterschied zwischen Einzelentfernungs- und Flächenmessung wird über das Installieren der Ablenkeinheit gebildet. Hierüber wird eine flächenhafte Erfassung durch die mechanische Bewegung und Beschleunigung der Spiegel ermöglicht (GRAFL 2012, S.5). Je nach Scannerbauform weist die Ablenkeinheit unterschiedliche Aufbauten und Funktionen auf. Hierzu sind zunächst folgenden Bauformen zu unterscheiden (vgl. Abbildung 8):

1. Kamerascanner
2. Hybridscanner
3. Panoramascanner

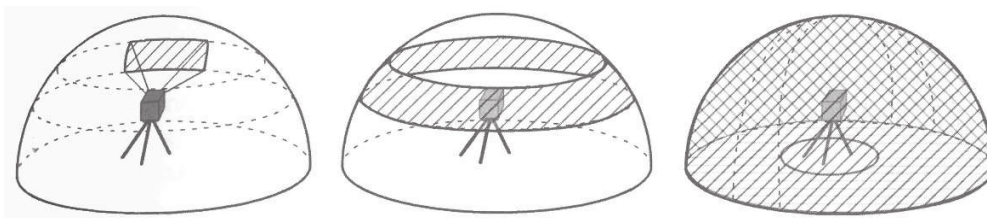


Abbildung 8: Scannerbauformen (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.41)

Neben dem Aufnahmewinkel lassen sich Laserscanner zusätzlich durch die oben aufgeführte Reichweiteneinteilung klassifizieren. Die nachfolgende Abbildung gibt hierzu einen Überblick.



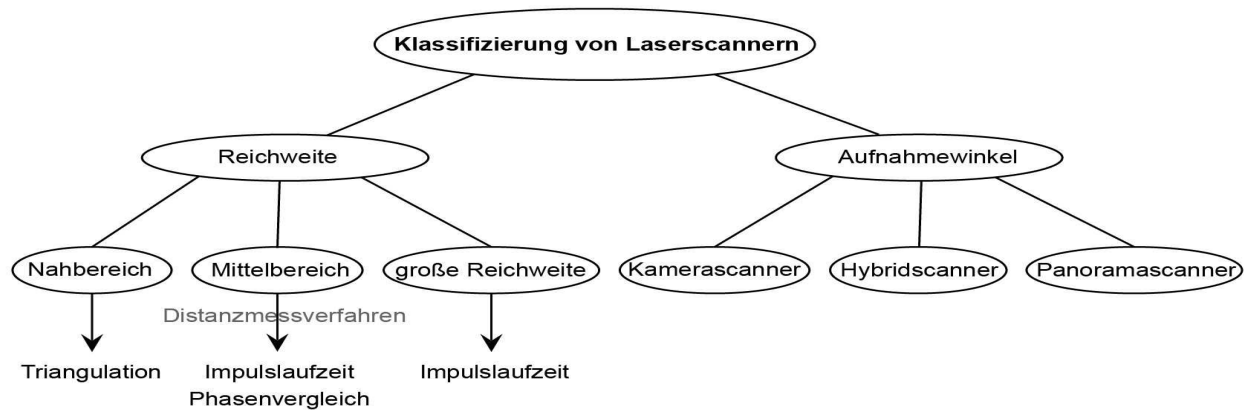


Abbildung 9: Klassifizierung von Laserscannern (aus textlicher Ausführung zusammengefasst aus STAIGER 2003 in DOLD 2010, S.13 und DOLD 2010 S.14.ff.)

Identisch wie bei einer Kamera erfasst der Kamerascanner den aufzunehmenden Objektbereich in einem definierten Ausschnitt, der innerhalb des Scanvorgangs nicht verändert wird. Mit diesem eingeschränkten Scanausschnitt eignet sich der Kamerascanner für Objekte, die sich in naher bis mittlerer Reichweite direkt vor dem Scanner befinden, also beispielsweise für Aufnahmen von Maschinen- oder Fassadenteilen. Ein grundlegendes Kriterium und großer Unterschied zu den anderen Bauformen besteht darin, dass sich die Scannerplattform nicht bewegt. Es kann mit einem Messvorgang nur der Bereich, der sich direkt vor der Optik befindet, aufgenommen werden. Der Aufnahmebereich oder das Gesichtsfeld des Scanners liegt abhängig vom Hersteller und der Konstruktionsform üblicherweise bei  $40^\circ$  in horizontaler Richtung und  $40^\circ$  in vertikaler Richtung. Über die Ablenkeinheit wird der Messstrahl nacheinander über zwei rotierende bzw. oszillierende Planspiegel sowohl horizontal als auch vertikal abgelenkt. Hierbei stehen die Rotationsachsen der Spiegel jeweils senkrecht zueinander. Durch die Umlenkung mit Hilfe der Spiegel entsteht ein Koordinatensystem mit x-, y- und z-Richtung (vgl. Abbildung 10).

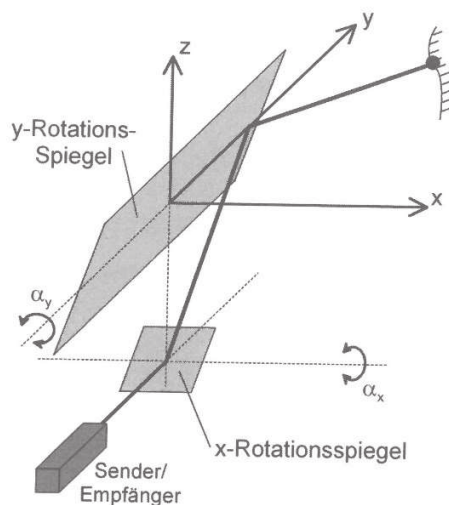


Abbildung 10: Ablenkeinheit Kamerascanner (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.326)

Um das Blickfeld des Kamerascanners zu erweitern, kann durch manuelles Drehen und Schwenken des gesamten Scanners der Aufnahmebereich vergrößert werden. Allerdings ist hierbei zu berücksichtigen, dass eine ausreichende Überlappung der jeweiligen Blickfelder vorliegt, damit die unterschiedlichen Einzelaufnahmen anschließend miteinander kombiniert werden können. Die Verwendung von Kamerascannern nimmt ab, da diese zunehmend von Hybrid- und Panoramascannern verdrängt werden.

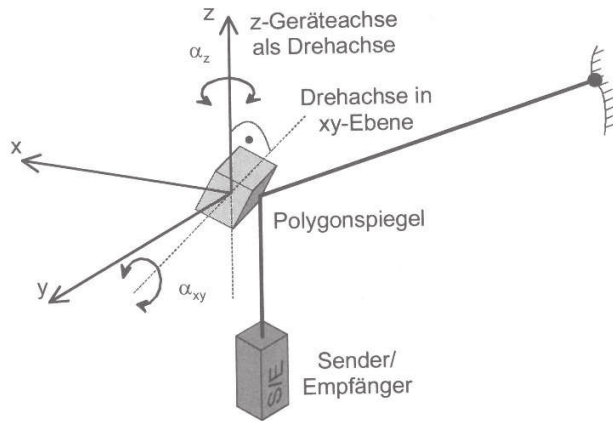


Abbildung 11: Ablenkeinheit Hybridscanner (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.327)

Hybridscanner hingegen sind nur im Höhenmessbereich eingegrenzt. Vom Standpunkt aus kann der Hybridscanner rundum horizontal bis  $360^\circ$  erfassen. Ein Hybridscanner eignet sich für einen Verwendungsbereich mit Objekten in mittlerer bis großer Reichweite. Ähnlich wie bei einem Tachymeteraufbau wird das Geräteoberteil langsam um die Stehachse gedreht. Die vertikale Sicht wird mit einem typischen Aufnahmebereich

von  $40^\circ$  bis  $60^\circ$  eingegrenzt. Mit Hilfe der Ablenkeinheit wird die Strahlenauslenkung durch drehende Planspiegel oder rotierende Polygonalspiegel in vertikaler Richtung realisiert (vgl. Abbildung 11). Dadurch werden vertikale Scanprofile erzeugt, die über die Rotation des Geräteoberbaues aneinander gereiht werden. Ergänzend kann dieses Verfahren mit einer Kippachse des gesamten Scannerkopfes ausgestattet werden, um den aufzunehmenden Höhenbereich zu erweitern. Somit kann der vertikale Gesamtaufnahmebereich über den Aufnahmebereich von  $40^\circ$  bis  $60^\circ$  des Fensterblickwinkels vergrößert werden.

Mit der Bauform des Panoramascanners ist ebenfalls eine rundum Aufnahme möglich, die nicht im Höhenbereich eingeschränkt ist und den „Überkopfbereich“ erfasst. Identisch zum Hybridscanner ist hier das Geräteoberteil um die Z-Achse schwenkbar. Hieraus ergibt sich ein horizontaler Messbereich von  $360^\circ$  (vgl. Abb.10). In der Vertikalen reicht der

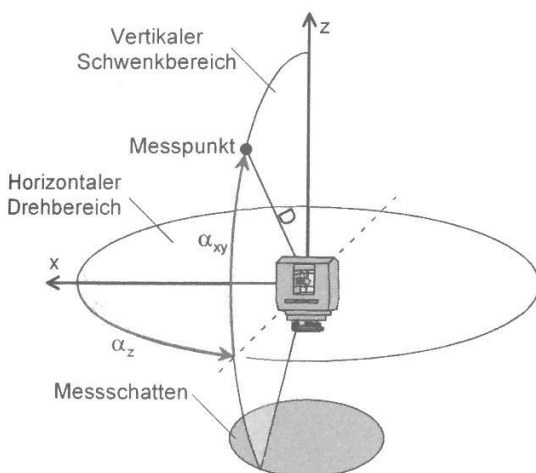


Abbildung 12: Schwenkbereich Panoramascanner (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.329)

Messbereich von  $140^\circ$  bis  $320^\circ$  und ist nur durch die Gerätehülle und den vom Stativ verursachten Messschatten eingeschränkt. Diese Scannerform eignet sich für einen Aufnahmebereich in mittlerer Reichweite. Für die vertikale Auslenkung sorgt eine auf dem Geräteoberteil sich mitdrehende Kippachse. Bei Panoramascannern besteht die Ablenkeinheit aus einem um die Kippachse rotierenden Zylinderstumpf (vgl. Abbildung 12). Der Planspiegel, der die Schnittfläche des

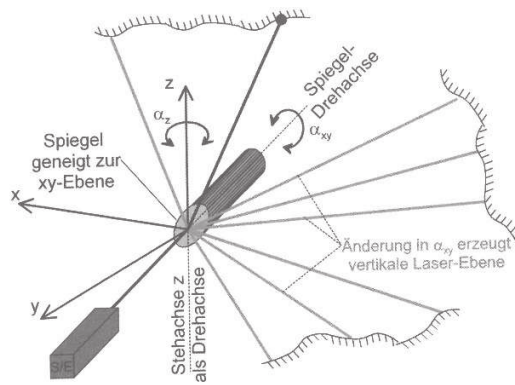


Abbildung 13: Ablenkeinheit Panoramascanner (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.329)

Zylinderstumpfes bildet, ist um  $45^\circ$  geneigt und befindet sich mittig zwischen der Stehachse des Gerätes und der Kippachse des Spiegels. Durch eine Rotation des Zylinderstumpfes werden die Laserstrahlen in vertikaler Richtung abgelenkt. Das beschriebene Verfahren wird bei den Herstellern „[...] CALLIDUS, ZOLLER+FRÖHLICH oder FARO [...]“

(STAIGER 2003 in JOECKEL ET AL. 2008, S.328.) angewendet. Bei dem Hersteller Leica wird die vertikale

Strahlenablenkung mit Schwenkspiegeln realisiert. Aufgrund seines großen vertikalen Sichtbereiches eignet sich der Panoramascanner besonders für Kompletttaufnahmen wie beispielsweise Innenbereiche (STAIGER 2003 in JOECKEL ET AL. 2008, S.325f.).

### Punktwolkenentstehung und Scannerzusammensetzung

Aus dem mittels der Ablenkeinheit erzeugten Drehwinkel der Spiegel und der aus der Distanzmessung generierten Entfernung entstehen, ähnlich wie bei einem Tachymeter, polare Messwerte. Diese Messwerte werden innerhalb des Scanners zu kartesischen xyz-Werten umgerechnet, wodurch eine 3D-Punktwolke entsteht (STAIGER 2003 in JOECKEL ET AL. 2008, S.339). Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht das Zusammenspiel der einzelnen Bestandteile und die Entstehung der Punktwolke.

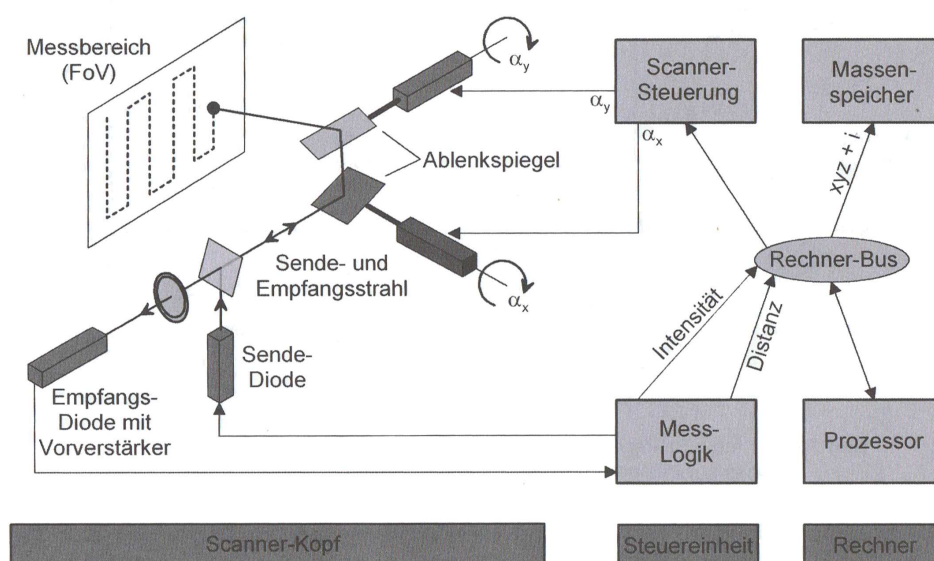


Abbildung 14: Gesamtkonstrukt Scanner (Nach JOECKEL ET AL. 2008, S.330)

Bei diesem Messverfahren wird mit Hilfe der 2D-Entfernungsmessung und der 2D- Abtastsysteme eine 3D-Gesamtaufnahme erzeugt. Über die maximale Ausdehnung der Ablenkeinheit in horizontaler- und vertikaler Richtung wird der Aufnahmebereich des Scanners definiert (GRAFL 2012, S.5). Ergänzend hierzu werden die neusten Panoramascanner heutzutage mit einer integrierten Kamera ausgestattet, wodurch eine rundum Bilderfassung ermöglicht wird (LICHTENSTEIN 2011, S6). Aus den von der Kamera gewonnen Bildern wird meist eine Kugelprojektion erstellt. Durch die Hinzunahme der Kameraaufnahmen kann den Scanpunkten der entsprechende Grau- bzw. Farbwert zugewiesen werden. Somit können die Objekte innerhalb der Punktwolke besser visualisiert und interpretiert werden (JOECKEL ET AL. 2008, S.321). Eine Punktwolke zeichnet sich dadurch aus, dass sie eine große Anzahl nicht klassifizierte, dreidimensionale Objektpunkte auf einer Objektoberfläche abbildet. Viele einzelne 3D-Koordinaten beschreiben die Oberfläche des Objektes (LICHTENSTEIN 2011, S3). Die Rohdaten der Gesamtaufnahmen in Form einer Punktwolke enthalten folgende Angaben (TAUBER 2005, S.8):

„- *vertikale und horizontale Richtung*

- *Distanz*

- *Intensität*

- *RGB-Farbwert (nur wenn der Scanner über eine Digitalkamera verfügt“* (TAUBER 2005, S.8)

### **Rahmenbedingungen, Genauigkeit, Fehlerquellen und Oberflächenbeschaffenheit**

Bei der dreidimensionalen Punkterfassung mittels terrestrischen Laserscannern lassen sich nach RESHETYUK (2006 in DOLD 2010, S.17) folgende Fehlerarten bei der Messung unterscheiden:

1. Instrumentenfehler
2. atmosphärische Fehler
3. objektbezogene Fehler
4. methodische Fehler

Die nachfolgende Grafik gibt einen Überblick über die möglichen Fehler.



Abbildung 15: Messfehler (aus textlicher Ausführung zusammengefasst aus DOLD 2010, S.17ff.)

Instrumentenfehler treten aufgrund der Bauart und der technischen Eigenschaften auf und teilen sich in zwei unterschiedliche Fehlerarten auf. Die erste Fehlerart beschreibt zufällige Fehler, die durch physikalische Beeinflussungen innerhalb der Entfernungsmessung oder durch eine physikalische Beeinflussung bei der Ablenkeinheit auftreten. Bei dieser Fehlerart handelt es sich um nicht korrigierbare Fehler. Die zweite Fehlerart beschreibt systematischen Fehler, die durch eine Kalibrierung oder einen Korrekturwert ausgeglichen werden können. Diese zwei Fehlerquellen sind weiterhin drei bauteilbezogenen Fehlerklassen unterzuordnen (DOLD 2010, S.17).

In erster Linie lassen sich Fehler in der Entfernungsmessung unterscheiden. Fehler bei der Entfernungsmessung entstehen indem das Signal von schlecht reflektierten Objekten zu spät registriert wird, da erst eine ausreichende Signalstärke vorliegen muss. Hierdurch ist die gemessene Laufzeit und die Entfernung zu lang. Dem kann mit einem von der Signalstärke abhängigen aufgerechneten Korrekturwert nach der Registrierung entgegengesteuert werden. Der Erfolg dieses Verfahrens ist jedoch stark von der Reflektivität des Objektes abhängig (THIEL u. WEHR 2004 in DOLD 2010, S.17).

Ein anderer nicht korrigierbarer zufälliger Fehler tritt durch die von der Größe des Laserspottes hervorgerufene Verzerrung der Messung auf. Im Zuge der Berechnung der Koordinaten wird von einem Mittelpunkt des Spottes ausgegangen. Wird das Objekt nur von der Außenkante des Spottes gestreift, verfälscht dies die Messung (LICHTI u. GORDON 2004 in DOLD 2010, S.17). Systematische Fehler bei der Entfernungsmessung, die durch einen konstanten Wert korrigiert wer-

den können, treten beispielsweise durch Temperaturschwankungen auf oder werden durch Nullpunktfehler hervorgerufen. Ein Nullpunktfehler beschreibt die „[...] *Abweichung zwischen mechanischem und optischem Nullpunkt* [...]“ (DOLD 2010, S.17). Im Zuge des Phasenvergleichsverfahrens kann die Distanzermittlung durch sogenannte Noniussprünge verfälscht werden. Diese Sprünge werden durch die Mehrdeutigkeit bei der Entfernungsmessung mittels Grob- und Feinmessung hervorgerufen. Hierdurch entstehen virtuelle Punkte innerhalb der Messung, die bestimmte Entfernungswerte aufweisen und durch einen Filter erkannt und beseitigt werden können (NOTH 2012, S.9).

Fehler innerhalb der Ablenkeinheit fallen ebenfalls in den Bereich der Instrumentenfehler. Hier muss der hervorgerufene Ablenkwinkel auch bei hohen Messraten ständig mit einer großen Messgenauigkeit erfasst werden. Dabei können sogenannte Offset- oder Skalierungsfehler auftreten, die die Messung verfälschen. Ein weiterer Messfehler kann aus der fehlerhaften Abstimmung zwischen der Winkelmessung und der Entfernungsmessung hervortreten (DOLD 2010, S.17).

Ergänzt werden die Instrumentenfehler als letztes durch auftretende Achsfehler. Diese Art von Fehlern entsteht durch eine Abweichung der Spiegelachsen und der Drehachse. Die Abweichung der Kippachse und der senkrecht zu ihr stehenden Drehachse verursacht eine verfälschte Winkelmessung (DOLD 2010, S.18). Diese Art von Fehlerquelle kann durch die mechanische Konstruktion der Drehlager verursacht werden, da eine präzise Arbeit aufgrund von Verschleiß oder Verunreinigung nicht mehr gewährleistet wird (TAUBER 2005, S.21).

TAUBER (2005, S.17) erweitert die instrumentellen Fehler durch Beeinträchtigungen der Distanzmessung. Diese Art kann durch eine fehlerhafte Impulslaufzeitmessung auftreten. Hierbei steht vor allem die Zeitmesseinheit im Mittelpunkt. Erfasst die Zeitmesseinheit die Laserimpulse nicht mehr genau und Impuls und Laufzeitmessung asynchron, können auch hier Fehler entstehen.

Atmosphärische Fehler bilden die nächste Fehlerart. Wie im ersten Abschnitt erwähnt, beruht die Laser-Distanzmessung auf der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lichtwellen. Diese Ausbreitungsgeschwindigkeit wird durch atmosphärische Einflüsse wie Umgebungstemperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Um die Beeinflussung bei der Entfernungsmessung zu berücksichtigen, wird die Brechzahl verwendet. Die Brechzahl beinhaltet einen Korrekturwert der von den



atmosphärischen Einwirkungen abhängig ist. Diese Einwirkungen sind jedoch bei den meisten Messverfahren zu vernachlässigen, da die Auswirkung auf die Entfernungsmessung gering ausfällt. Deutlich wird dies an folgendem Beispiel: *„Bei einer Temperaturdifferenz von 10° Celsius und 40 hPa liegt der Distanzfehler bei einer Messung von 100 m bei ca. 2 mm und somit unterhalb der Distanzgenauigkeit der meisten Geräte“* (TAUBER 2005 in DOLD 2010, S.18). Die meisten Scanner weisen eine Betriebstemperatur von 0° bis 40° Celsius auf (LEMMENS, 2009A in BIENERT 2013, S.42). Wesentlich größere Beeinträchtigungen können durch Partikel in der Luft entstehen. Ursachen hierfür können beispielsweise die Beeinflussung von Staub, Regentropfen oder Dampf sein. Durch die Reflektion an diesen Störkörpern kann die Messung Fehler enthalten (DOLD 2010, S.18). Aus diesen Gründen sind vor allem Messungen bei Schneefall oder Regen aber auch in Bereichen mit großer Staubeentwicklung nicht fehlerfrei durchführbar. Zusätzlich zu den Partikeln in der Luft kann auch die Geräteoptik mit Partikeln verschmutzt werden und das Messergebnis verfälschen (PLANK ET AL. 2011, S.45). GRAFL (2012, S.33) ergänzt zu den atmosphärischen Einflüssen das Phänomen Wind. Dieser kann kleine bewegliche Objekte in Bewegung setzen und dadurch die Messung verfälschen.

Die nächste Fehlerquellenart kennzeichnen die objektbezogenen Fehler. Ein objektbezogener Fehler wird durch die Beschaffenheit aufzunehmender Objekte hervorgerufen. Maßgebend für die Distanzmessung ist, dass ein Teil der ausgesendeten Strahlen zurückgeworfen wird, damit dieses Signal registriert werden kann. Die Stärke des zurückgeworfenen Signals wird als Intensitätswert bezeichnet. Dieser Wert ist von der Entfernung zum Messobjekt und der Reflexionseigenschaft des Objektes abhängig (TAUBER 2005, S.16). Bei der Entstehung von Reflexionen wird in drei unterschiedliche Reflexionsarten unterschieden. Die erste Reflexionsart ist die diffuse Reflexion. Hier wird das Licht abhängig von der Rauigkeit der Oberfläche gemäß dem Strahlungsgesetz diffus in alle Richtungen zurückgeworfen. Dem gegenüber steht die Spiegelreflexion. Sie beschreibt eine komplette Reflexion der ausgesendeten Strahlen. Bei schrägem Einfallswinkel bedeutet dies, dass keine Signale beim Empfänger ankommen und keine Entfernung gemessen werden kann. Die Spiegelreflexion kommt meist bei natürlichen Objekten nicht vor. Sobald der Strahl zum größten Teil wieder zurückgeworfen wird, spricht man von einer Retroreflexion (vgl. Abbildung 16) (DOLD 2010, S.18). Hier wird der Strahl in die entgegengesetzte Richtung zurückgeworfen und verläuft parallel zum dem ausgesendetem Strahl. Die diffuse Reflexion ist bei der Distanzmessung wünschenswert. *„In der Natur treten eher Mischformen auf, d.h. die meisten Reflektoren besitzen sowohl einen Anteil an diffuser als auch gerichteter Reflexion“* (TAUBER 2005, S.17).



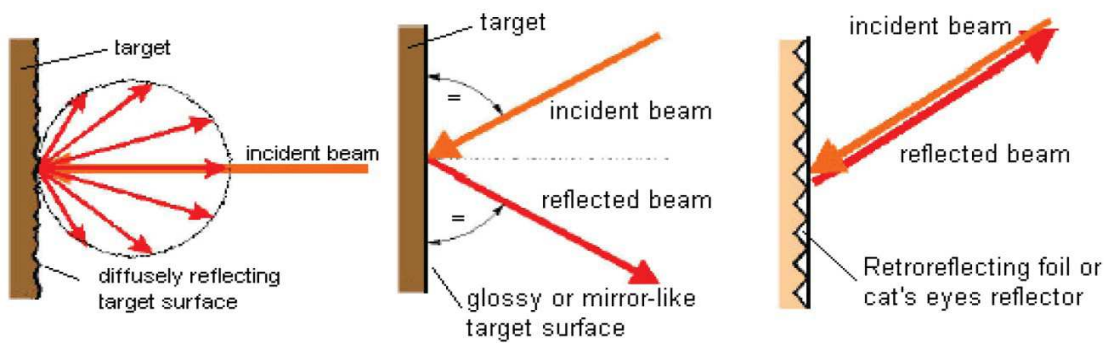


Abbildung 16: Diffuse Reflexion, Spiegelreflexion, Retroreflexion (Nach FIRMA RIEGEL in TAUBER 2005, S.16f.)

Eine weitere Fehlerquelle besteht, wie oben erwähnt, in der Oberflächenbeschaffenheit der Materialien. Die Oberflächenbeschaffenheit des aufzunehmenden Materials beeinflusst die Stärke des reflektierten Signals. Hierbei nehmen die Oberflächenstruktur und die Farbe der Materialien einen Einfluss auf die reflektierte Signalstärke. Unterschiedliche Materialien wie beispielsweise Stein, Holz, Metall oder Styropor weisen unterschiedliche Reflexionsstärken auf. Die Stärke der Reflexion

| Material              | Reflexionskoeffizient |
|-----------------------|-----------------------|
| schwarzer Gummireifen | 2%                    |
| schwarzer Neopren     | 5%                    |
| Asphalt               | ca. 20%               |
| Sandstrand            | ca. 50%               |
| Laubbäume             | ca. 60%               |
| Kalkstein             | bis zu 75%            |
| Schnee                | 80 bis 90%            |
| weißes Papier         | bis zu 100%           |

Abbildung 17: Reflexionskoeffizienten (Nach TAUBER 2005, S.17)

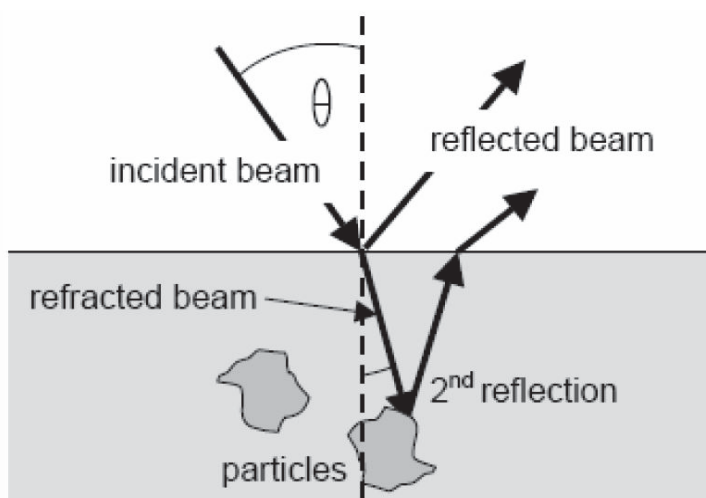


Abbildung 18: Strahleneindringung bei Styropormaterialien (Nach INGENSAND, RYF, SCHULZ 2003 in TAUBER 2005, S.23)

wird mit dem Reflexionskoeffizienten beschrieben und reicht von 0 % bis 100% (KERSTEN u.a. 2005 in DOLD 2010, S.18). In der nachfolgenden Tabelle werden die Reflexionskoeffizienten für eine Wellenlänge von 900 nm für einige Materialien beispielhaft aufgeführt. Zusätzlich zur Oberflächenbeschaffenheit spielt die Transparenz, Dichte und Transluzenz eine wichtige Rolle. Sobald der Laserstrahl in Materialien eindringen kann und erst im Inneren reflektiert wird, entsteht auch hier eine fehlerhafte Distanzmessung. Verdeutlicht wird dies an der nachfolgenden Skizze, die die Strahleneindringung bei Styropormaterialien zeigt (TAUBER 2005, S.23).

Die letzte objektbezogene Fehlerquelle besteht in der Form der Materialien. Durch unterschiedliche Formen der Objekte werden Messfehler hervorgerufen. Deutlich wird dies bei der Distanzaufnahme von Ecken oder Kanten. Die von einer großen Strahlendivergenz hervorgerufene Reflexionsfläche verfälscht die Messung im Bereich von Ecken und Kanten. Der Messstrahl von einzelnen Flächen wird unterschiedlich zurückgeworfen (vgl. Abbildung 19) (DOLD 2010, S.18). Dies führt dazu, dass die gemessene Strecke bei Innenecken kürzer und bei Außenecken länger ausfällt (DOLD 2010, S.18). Eine weitere mögliche Beeinträchtigung entsteht durch den vom

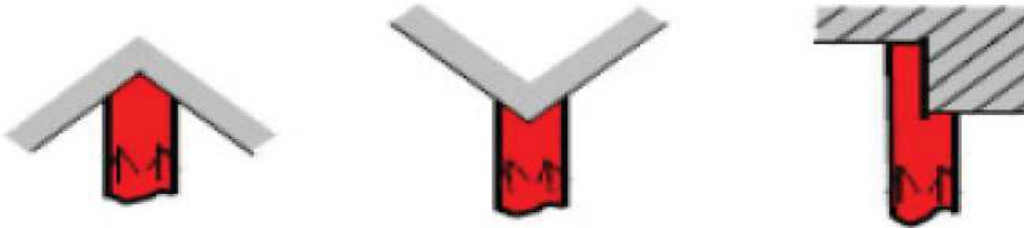


Abbildung 19: Darstellung von Eckmessfehlern (REMUS 2002 in TAUBER 2005, S.23)

Messstrahl hervorgerufenen „Kometenschweif“. Dieser Schweif entsteht durch die Aufspaltung des Laserstrahls, die eintritt, wenn der Strahl das Messobjekt streift und nicht vollständig erfasst. Hierdurch enthält das reflektierte Signal zwei Distanzmessungen. Zum einen die des ersten Hindernisses, wo sich der Strahl spaltet und zum anderen die Distanz zum nächsten Hindernis an dem der gespaltene Strahl auftrifft. Letztendlich wird die Entfernung aus den beiden Signalen gemittelt, wodurch eine Verzerrung entsteht (PRZYBILLA 2012a in NOTH 2012, S.8). RESHETYUK (2006 in DOLD 2010, S.19) erweitert die objektbezogenen Fehler um die Polarisation des Lichtes, die Temperatur und die Feuchtigkeit des Objektes.

Methodische Fehler beschreiben die vierte und letzte Fehlerquellenart. Diese Art der Fehlerquelle wird weder durch das Objekt oder dessen Umgebung noch durch das Instrument hervorgerufen. Sie entsteht durch Fehler in der Durchführung des Messvorganges. Dies geschieht beispielsweise durch eine zu geringe Anzahl von Standpunkten, wodurch überschattete Bereiche nicht erfasst werden. So kann eine mangelnde Anzahl von Verknüpfungspunkten Grund für die Fehlerquelle sein. Hierdurch können die einzelnen Standpunkte nicht zusammengefügt werden. Zudem kann ein methodischer Fehler durch eine fehlerhafte Mittelpunkterkennung von Zielmarken hervorgerufen werden (KERSTEN u.a. 2004 in DOLD 2010, S.19).

### Standpunktplanung und Einsatz von Referenzpunkten

Beim TLS ist die Standpunktwahl zunächst von der Scannerbauform abhängig, da hierdurch die Reichweite und das Sichtfeld des Scanners definiert werden. Des Weiteren ist die Objektgröße und Ausdehnung zu berücksichtigen (BIENERT 2013, S.23). Im Zuge der Aufnahme mittels terrestrischem Laserscanning werden häufig unterschiedliche Scannerstandpunkte für ein einzelnes Objekt verwendet (KERSTEN ET AL. 2008, S.36). Dabei bezeichnet man das Scannen von Objekten mit nur einem Standpunkt als „Single-Scan“ und das Scannen von mehreren Standpunkten aus als „Multiple-Scan“ (THIES & SPIECKER 2004 in BIENERT 2013, S.26). Bei einem „Multiple-Scan“ müssen die unterschiedlichen Koordinatensysteme jedes einzelnen Standortes anschließend zusammengeführt werden. Hierbei werden entweder nacheinander die Koordinaten von je zwei Scans zusammengeführt oder es werden alle Koordinaten gleichzeitig in ein gemeinsames Koordinatensystem umgerechnet. Meistens wird hierbei das Koordinatensystem des ersten Standpunktes als Grundlage verwendet. Darauf aufbauend kann das lokale Scannerkoordinatensystem in ein übergeordnetes Georeferenzsystem übertragen werden. Das Zusammenfügen der einzelnen Scans wird als Registrierung bezeichnet, worauf im nächsten Unterkapitel genauer eingegangen wird.

#### 4.1.3 Registrierung und Weiterverarbeitung von Punktwolken

Im Anschluss an die Punktwolkengenerierung erfolgt die Auswertung der Daten. Hierbei spielt es eine entscheidende Rolle, zu welchem Zweck die Aufnahmen generiert wurden. *„Entscheidend für den umfassenden Erfolg der optischen 3D-Meßtechnik sind geschlossene Lösungen mit hoher Leistungsfähigkeit, die von der Signalisierung und Abtastung der Oberflächen über die Extraktion von Punktwolken bis zur geforderten Qualitätsbewertung, zum komplexen Messergebnis oder zum Produkt (rapid prototyping) reichen.“* (FRANKE ET AL. 2012, S.1).

Einer der Hauptverwendungszwecke von scannergenerierten Daten besteht in der Weiterverarbeitung in einem CAD-System. In diesem Falle ist die Erstellung eines CAD-Flächenmodelles eine Möglichkeit (FRANKE ET AL. 2012, S.1). Eine weitere Möglichkeit der Datenübergabe in ein CAD-System besteht im Ansatz der automatisierten Modellierung. Hierbei werden mit Hilfe einer Software zuvor definierte Objekte wie beispielsweise Rohrleitungen aus der Punktwolke durch einen Algorithmus herausgefiltert und über die geometrischen Gemeinsamkeiten abgeleitet. Auf Grundlage der zuvor definierten Objekte wird somit nach und nach das Scanmodell rekonstruiert (KERSTEN ET

AL. 2008, S.41f.). Im Bereich der Vegetationserfassung besteht ebenfalls die Möglichkeit, Vegetationsstrukturen automatisch aus Punktwolken abzuleiten. Hierbei werden mit Hilfe verschiedener Algorithmen die Baumstrukturen aus der Punktwolke gefiltert (GRAFL 2012, S.17). Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Scandaten zu einem Soll-Ist-Vergleich zu verwenden (FRANKE ET AL. 2012, S.1) oder diese als Profile oder Schnitte in ein CAD-System zu übergeben (KERSTEN ET AL. 2008, S.41.). Darüber hinaus können die reinen Messwerte zur Verschleißkontrolle benutzt werden. Die Übergabe der Scandaten in eine FEM-Berechnung (finite Elemente) stellt eine weitere Möglichkeit der Weiterverarbeitung dar (FRANKE ET AL. 2012, S.1). Der letzte hier zu nennende Verwendungszweck von dreidimensionalen Scandaten besteht in der Visualisierung. Damit die Darstellung der gescannten Objekte innerhalb eines Visualisierungsprogrammes gewährleistet werden kann, muss die Punktwolke mittels einer Dreiecksvermaschung in ein Oberflächengitter umgewandelt werden. Dieses Oberflächengitter kann in den jeweiligen Visualisierungsprogrammen eingelesen, modelliert und texturiert werden (KERSTEN ET AL. 2015, S.83f.). Ohne den Arbeitsschritt der Dreiecksvermaschung können auch reine Punktwolken visualisiert werden. Bei diesem Verfahren werden die texturierten Punktwolken direkt dargestellt (LEITNER ET AL. 2011, S.8f.). Generell beinhaltet der Prozess der Weiterverarbeitung folgende Einzelschritte:

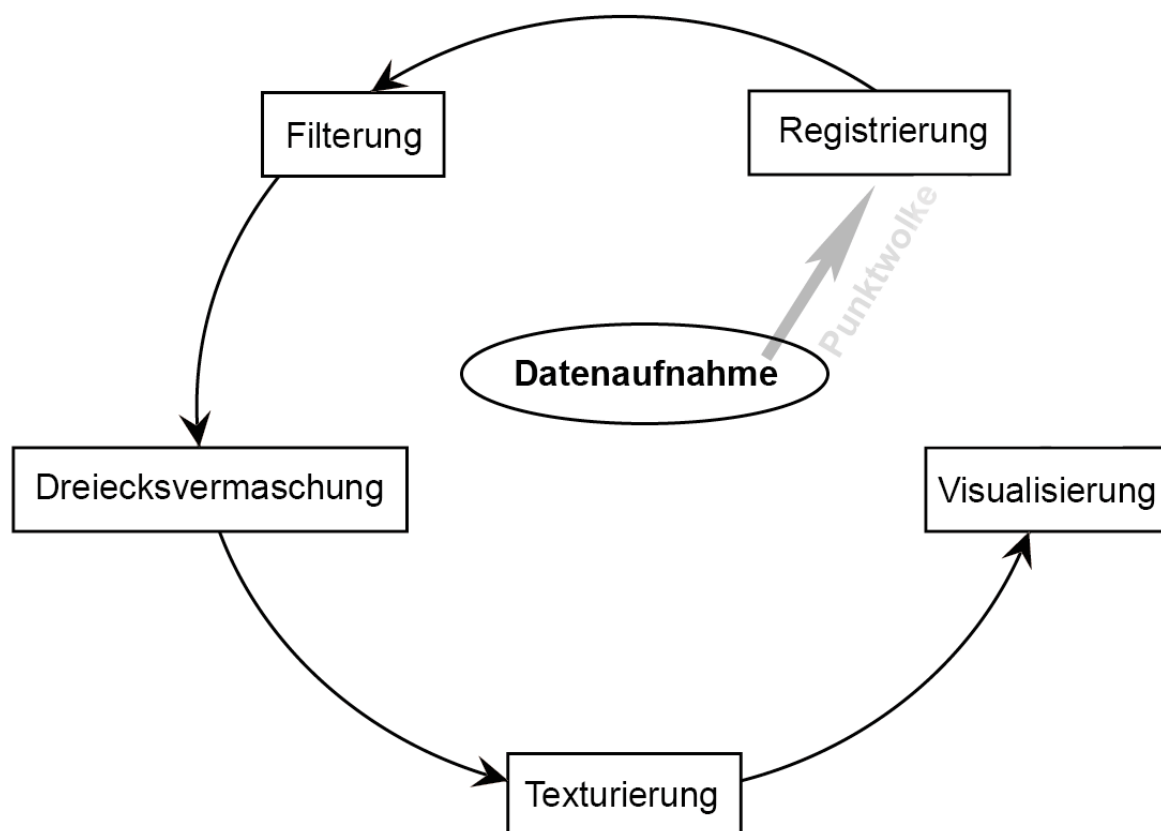


Abbildung 20: Von der Datenaufnahme bis zur Visualisierung (BRENNER 2008, S.171; Dold 2010, S.8f.).

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte detailliert erläutert.

### Registrierung

Wie bereits erläutert, dient der Vorgang der Registrierung zur Zusammenführung von mehreren Einzelscans zu einer Punktwolke. Bei der Registrierung unterscheidet man drei verschiedene Verfahren um die einzelnen Messungen miteinander zu verknüpfen (KERSTEN ET AL. 2008, S.36):

1. Registrierung über Zielmarken
2. Registrierung über datengetriebene Lösungen
3. Registrierung durch direkte Georeferenzierung (KERSTEN ET AL. 2008, S.36)

Unter Verwendung der Zielmarken kommen verschiedene Objekte zur Passpunkterkennung in Frage. Zur eindeutigen Referenzierung der einzelnen Standpunkte müssen die Zielmarken um das aufzunehmende Objekt verteilt werden. Hierbei ist zu beachten, dass mindestens drei identische Zielmarken von den jeweiligen Standorten sichtbar sind, um eine Überlappung der Aufnahmen zu gewährleisten (BIENERT 2013, S.29). Als Zielmarken können Kugeln oder Targets verwendet werden (KERSTEN ET AL. 2008, S.36). BIENERT (2013, S.29) ergänzt die Passpunkte um runde oder eckige Zielmarken mit Schachbrettmuster und Zylinderzielmarken. Bei Laserscannern, die das Phasenvergleichsverfahren zur Distanzmessung verwenden, können zudem einfache Papierzielzeichen benutzt werden. In Bezug auf die verwendeten Distanzmessverfahren ist zu berücksichtigen, dass die Zielmarkenerkennung bei dem Phasenvergleichsverfahren halbautomatisch erfolgt und die Messung der Zielmarken nicht gesondert vollzogen werden muss. Dementsprechend erfolgt die Zielmarkenmessung hier sehr schnell und innerhalb des normalen Scanvorgangs. Unter Verwendung des Impulslaufzeitverfahrens hingegen muss jedes Zielzeichen einzeln gemessen werden, was einen großen Zeitaufwand verursacht. Die Zeichenerkennung erfolgt anschließend automatisch (KERSTEN ET AL. 2008, S.36f.).

Bei der Variante der datengetriebenen Registrierung geschieht die Verknüpfung der Standpunkte nur über Punkte, die innerhalb der Messdaten vorhanden sind. Hier werden keine manuellen Passpunkte zur Referenzierung angebracht. Grundlage hierfür ist eine ausreichende Überlappung der Scanstandpunkte. Im Zuge der datengetriebenen Registrierung werden zwei Stufen der Referenzierung durchgeführt. Die erste Stufe ist die Grobregistrierung und erfolgt über identische Geometrien wie z.B. Punkte, Linien oder Ebenen innerhalb der Messdaten. Im Anschluss folgt die Feinregistrierung, die mit Hilfe eines automatisierten ICP-Algorithmus (Iterative Closest Point) Überlappungsbereiche identifiziert (KERSTEN ET AL. 2008, S.39).

Die letzte Variante der Registrierung, die direkte Georeferenzierung basiert auf der Verwendung zweier zusätzlicher GPS Empfänger. Hierbei wird der Standpunkt des Scanners mit Hilfe von zwei aufgesetzten GPS Empfängern global erfasst (PFAFFENHOLZ & KUTTER 2008 in KERSTEN ET AL. 2008, S.39). „*Statt der GPS Empfänger ist eine Positionierung über ein an dem Scanner angebrachtes Prisma, das laufend vom Tachymeter gemessen wird, auch möglich.*“ (KERSTEN ET AL. 2008, S.39). Bei der indirekten Georeferenzierung werden bekannte Passpunkte von möglichst vielen Standpunkten aus aufgenommen, die zuvor georeferenziert eingemessen worden sind oder deren Lage in einem übergeordneten Koordinatensystem bekannt ist. Hierüber erfolgt anschließend die Umrechnung in ein geordnetes Koordinatensystem wie beispielsweise ein Landeskoordinatensystem (GRAFL 2012, S.10).

### **Filterung/Ausdünnen**

Eine Filterung beziehungsweise eine Ausdünnung der aufgenommenen Punktwolke ist aufgrund der scanner- und objektspezifischen Messfehler notwendig. Diese Messfehler müssen entweder auf automatische oder manuelle Weise entfernt werden. Der Ursprung dieser Messfehler kann beispielsweise in der Reflexion von nicht gewünschten Fremdkörpern liegen oder in dem sogenannten Messrauschen bestehen (vgl. Kapitel 4.1.2). Um das Messrauschen zu verringern werden Glättungs-Algorithmen verwendet um nicht benötigte Punkte zu beseitigen (ZOGG u. SCHULZ 2006, S.423). Die Anwendung dieser Filter und Algorithmen findet meist in den Weiterverarbeitungsprogrammen der Scannerhersteller wie zum Beispiel Z+F LaserControl von Zoller und Fröhlich (NOTH 2012, S.58), 3Dipsos von Trimble (KERSTEN ET AL. 2005, S.138) oder Scanworks von Mensi (BÖHLER ET AL. 2002, S.18) statt. Daneben können Drittanbieter-Produkte wie Geomagic (KERSTEN ET AL. 2015, S.83) zur Anwendung kommen.

Eine weitere Notwendigkeit der Filterung besteht in der durch die Verwendung von mehreren Standpunkten entstehenden Überlappung. Durch diese Überlappungen weist die Punktwolke in diesen Bereichen eine größere Punktdichte auf. Hierdurch entsteht eine unnötig große Datenmenge, die durch Filterungen behoben werden kann. Im Zuge der Filteranwendung wird die Punktdichte in eine gleichmäßige Form gebracht, wodurch die Datenmenge reduziert wird. Bei der Filterung kann nach verschiedenen Kriterien wie beispielsweise einer räumlichen Filterung mit einem wählbaren Mindestabstand der Punkte oder einem intensitätsbasierten Filter gearbeitet werden (KERSTEN ET AL. 2005, S.138). Eine mögliche Filterform für die Überlappungsbeseitigung ist mit dem Voxelg-

rid-Filter gegeben. Ein Voxel beschreibt GRAFL (2012, S.17f.) als die Unterteilung eines Raumes in standardisierte Zellen. Voxel sind dementsprechend das dreidimensionale Gegenstück zu den zweidimensionalen Pixeln. Der Voxelraum bildet eine gleichabständige 3D-Gitterstruktur, der die Punktwolke umfasst. Das Voxelgrid erstreckt sich über den gesamten Bereich der Punktwolke. Innerhalb eines Voxels werden alle vorhandenen Messpunkte zu einem Mittelwert zusammengefasst, wodurch die Bereiche mit einer großen Punktdichte verringert werden (SCHUBERT 2014, S.18). Mit der Anwendung eines Range-Filters können Punkte in einem definierten Entfernungsbereich gelöscht werden. Eine Form der manuellen Filterung besteht in der Segmentierung. Hier kann mittels einer rechtwinkligen Box oder mit einem Polygonzug der gewünschte Bereich der Punktwolke begrenzt werden (KERSTEN ET AL. 2008, S.40). Zusätzlich kann bei manchen Auswertungsprogrammen ein Mirror-Filter angewendet werden der Messpunkte auf Glasoberflächen herausfiltert, da diese durch das Durchdringen der Glasoberfläche verfälscht werden (NOTH 2012, S.61). Weiterhin kann durch eine gezielte Filterung die Vegetation ausgeblendet werden (KERSTEN ET AL. 2015, S.83). Bei der Verwendung eines Scanners mit Phasenvergleichsverfahren werden aufgrund der Eigenschaften dieses Messverfahrens (siehe Kapitel 4.1.2) weitere Filterungen notwendig. Hierzu zählt der Mixed-Pixel-Filter, der nicht korrekt gemessene Punkte in Bereichen von Kanten herausfiltert, die aufgrund der Strahlendivergenz nicht korrekt gemessen wurden (siehe Kapitel 4.1.2). Des Weiteren besteht die Möglichkeit nach Single-Pixeln zu filtern. Hierbei können einzeln auftretende Pixel entfernt werden. Darüber hinaus kann mit dem Smoothing und Median-Filter die Punktwolke geglättet werden. Bei dieser Filterung besteht jedoch die Gefahr der Datenverfälschung (KERSTEN ET AL. 2008, S.40).

Das Ziel der Filterung besteht schlussendlich darin, möglichst wenig Datenaufwand zu erzeugen aber dabei so viele Details des Originals zu behalten, wie möglich (BUCHBACH 2012, S.5). In BUCHBACH (2012) wird eine Vielzahl von möglichen Ausdünnungsalgorithmen vorgestellt und deren Anwendungsbereiche erläutert. In diesem Zusammenhang wird an dieser Stelle darauf jedoch nicht weiter eingegangen.

### **Dreiecksvermaschung/Modellierung**

Um die Punktwolke anschließend an die Filterung als Oberflächenmodell zu visualisieren, ist der Arbeitsschritt der Vermaschung bzw. der Modellierung notwendig (BÖHLER ET AL. 2002, S.29). Im Zuge dieser Weiterverarbeitung unterscheidet DOLD (2010, S.8) zwei Formen der Verarbeitung.



Zum einen die ikonische Verarbeitung, die die Modellierung der Messdaten durch eine Triangulation beschreiben und zum andern die symbolische Verarbeitung, die sich durch das Herausarbeiten von besonderen Punkten wie Ebenen, Zylindern, Kugeln, Fenstern oder kompletten Gebäuden auszeichnet. KERSTEN ET AL. (2008, S.39) unterscheidet hingegen den Bereich der manuellen Rekonstruktion und den der automatischen Oberflächenmodellableitung. Die Form der manuellen Rekonstruktion ist hierbei der symbolischen Verarbeitung gleichzusetzen. Im Zuge dieser halbautomatisierten Methode werden, wie erwähnt, Objektmodellierungen aus den Messdaten extrahiert. Für diese Art der Rekonstruktion kommen Programme der Systemlösungen von Leica Cyclone oder Faro Scene zum Einsatz (KERSTEN ET AL. 2008, S.39f.).

Die Triangulation beschreibt eine Bildung von Dreiecksflächen auf Grundlage der Punktwolke. Hierbei werden benachbarte Punkte unter bestimmten Regeln meist mittels Dreiecken miteinander verbunden. Somit entsteht nach und nach eine vermaschte Oberfläche bzw. ein Volumenmodell aus der Punktwolke (DOLD 2010, S.8). Die Verwendung von Dreiecksnetzen ist im Bereich der Computergrafik ein Standardverfahren zur Modellierung (BUCHBACH 2012, S.1). Um die Erstellung und Bearbeitung von Dreiecksvermaschungen zu realisieren stehen ebenfalls zahlreiche Programme zur Verfügung (SCHNEIDER 2008, S.62). Hierzu zählen beispielsweise Innovmetric Polyworks, Geomagic Studio (SCHNEIDER 2008, S.62), 3Dipsos und RealWorks Survey (KERSTEN ET AL. 2005, S.138). Die Oberflächenrückführung mittels einer Triangulation eignet sich vor allem für Freiflächenformen, die nicht durch regelmäßige Geometrien zu beschreiben sind (SCHNEIDER 2008, S.62). Nach der automatischen Dreiecksvermaschung bedarf es jedoch noch weiterer Arbeitsschritte, um die Vermaschung von Fehlern zu beheben. Dies kann eine nachträgliche Glättung der Oberfläche oder das Löschen von unerwünschten Dreiecken sein. Weiterhin besteht die Möglichkeit systembedingte Löcher im Dreiecksnetz manuell zu füllen (KERSTEN ET AL. 2005, S.139f.). Die Dreiecksverbindungen können untereinander getauscht und angepasst werden. Bei den meisten Softwareprodukten lassen sich den Dreiecken Farbwerte zuweisen (KERSTEN ET AL. 2008, S.47f.). Hierzu wird *„[...] jedem erzeugten Dreieck ein Farbwert zugewiesen, der aus [...] drei verwendeten Punkten interpoliert wird.“* (KERSTEN ET AL. 2008, S.48.) Das Ausmaß der Einstellungsmöglichkeiten bei der Berechnung eines Dreiecksnetzes wird dadurch deutlich, dass das Datenvolumen der Datensätze um 10-20% reduziert werden kann (KERSTEN ET AL. 2008, S.48.).

### Texturierung

Die Textur eines Objektes stellt die Farbgebung und das Muster der jeweiligen Oberfläche dar. Durch Veränderungen in der Farbe oder Transparenz wird die Textur in der Darstellungsweise eines Objektes bzw. Dreiecksgitters beeinflusst (SEIFERT 2009, S.33.). Im Bereich der 3D-Scanner wird die Textur und die dazugehörige Farbinformation der einzelnen Objekte mit Hilfe der gewonnenen Panoramafotos automatisch erstellt. Durch die Überschneidung der Fotos und Scanaufnahmen wird eine fotorealistische Darstellung ermöglicht (NOTH 2012, S.64). Im Zuge der Texturierung stehen in den geläufigen Softwareprogrammen drei unterschiedliche Wege zur Verfügung (KERSTEN ET AL. 2008, S.51):

1. „*Texturierung durch manuelles Matching von identischen Punkten in Modell und Bild ohne Kamerakalibrierungsdaten (z.B. in Real Works Survey und in Geomagic)*
2. *Texturierung durch manuelles Matching von identischen Punkten in Modell und Bild mit Kamerakalibrierungsdaten (z.B. in QTSculptor)*
3. *Automatische Texturierung durch Verwendung von Bildorientierungsdaten und Kamerakalibrierungsdaten mit Farbausgleich (z.B. 3D Image Software der TU Braunschweig (Abdelhafiz & Niemeier, 2006))* (KERSTEN ET AL. 2008, S.51).

Die beiden Verfahren des manuellen Messens identischer Punkte sind aufwendig und das Ergebnis ist meist nicht realitätsnah. Im Bereich der automatischen Texturierung besteht noch Entwicklungspotential, da es hierzu noch keinen optimalen Lösungsweg gibt (KERSTEN ET AL. 2008, S.51).

### Visualisierung

Die Visualisierung von Punktwolken kann generell in zwei verschiedenen Methoden erfolgen. Zum einen kann eine direkte Punktwolkenvisualisierung und zum anderen eine Visualisierung der aus den Punktwolken generierten Objekte bzw. Netze erfolgen.

Im Bereich der direkten Punktwolkenvisualisierung werden von den Laserscannerherstellern unterschiedliche Viewer zur Betrachtung der Punktwolken angeboten. Hiermit können Einzel- und registrierte Gesamtpunktwolken visualisiert werden. In den Viewern kann der Nutzer nicht nur die Punktwolke betrachten sondern auch Koordinaten und Strecken messen. Der Systemhersteller Lei-

ca GeoSystems bietet beispielsweise die Freeware Programme TrueView und TrueSpace an. Ein unabhängiger Viewer steht durch die Software AECVIZ zur Verfügung (KERSTEN ET AL. 2008, S.50).

Eine weitere Möglichkeit der Punktwolkenvisualisierung besteht in der Anwendung von Studio Clouds der Firma Alice Labs. Dieses Plugin bietet die Möglichkeit eines direkten Importes in professionelle 3D-Visualisierungs- und Animationssoftware wie Maya oder 3ds Max Design (NOTH 2012, S.68). Das Angebot der verschiedenen Visualisierungsprogramme deckt einen großen Markt ab. insgesamt gibt es über 500 verschiedene Anbieter (z.B. 3D Studio Viz oder Highlight Pro) (KERSTEN ET AL. 2008, S.51). Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Auszug möglicher Weiterverarbeitungsprogramme für Punktwolken.

Tabelle 4: Vergleich verschiedener Weiterverarbeitungsprogramme

| Programme:       | Hersteller:             | Funktionen            |               |                |                    |                |           |              |                     |              | Quelle: |   |
|------------------|-------------------------|-----------------------|---------------|----------------|--------------------|----------------|-----------|--------------|---------------------|--------------|---------|---|
|                  |                         | System/Drittanbieter: | Registrierung | Referenzierung | Geo-Referenzierung | Visualisierung | Filterung | Modellierung | Dreiecksvermaschung | Texturierung |         | Übergabe CAD  |
| Pointcloud       | Kubit                   | DA                    |               |                |                    |                |           |              |                     |              | ✓       | KERSTEN ET AL 2008, S.35;<br>KOLBE 2010, S.38                   |
| CloudWorx        | Leica                   | SY                    |               |                |                    |                |           |              |                     |              | ✓       | KERSTEN ET AL 2008, S.35  |
| Geomagic         | Wrap                    | DA                    | ✓             |                |                    |                | ✓         | ✓            | ✓                   | ✓            |         | KERSTEN ET AL 2008, S.35;<br>MARBS 2003, S.7                    |
| Qualify          |                         | DA                    | ✓             |                |                    |                |           | ✓            | ✓                   |              |         | KERSTEN ET AL 2008, S.35  |
| PolyWorks        | Innov Metric            | DA                    | ✓             |                |                    |                |           | ✓            | ✓                   |              |         | KERSTEN ET AL 2008, S.35  |
| Lasercontrol     | Z+F                     | SY                    | ✓             | ✓              | ✓                  |                | ✓         |              |                     |              |         | KERSTEN ET AL 2008, S.35;<br>GRAFL 2012, S.35                   |
| Cyclone          | Leica                   | SY                    | ✓             | ✓              | ✓                  |                | ✓         | ✓            |                     |              | ✓       | KERSTEN ET AL 2008, S.35;<br>AJLANI 2008, S.65; MARBS 2003, S.7 |
| Scene            | Faro                    | SY                    | ✓             | ✓              | ✓                  |                | ✓         |              |                     |              |         | KERSTEN ET AL 2008, S.35;<br>BIENERT 2013, S.127                |
| RealWorks Survey | Trimble                 | SY                    | ✓             | ✓              | ✓                  |                |           | ✓            |                     | ✓            |         | KERSTEN ET AL 2008, S.35  |
| 3Dipsos          | Trimble                 | DA                    |               |                |                    |                |           | ✓            | ✓                   |              | ✓       | KERSTEN ET AL 2008, S.35;<br>KERSTEN ET AL 2005, S.131          |
| RapidForm        | INUS                    | DA                    |               |                |                    |                |           | ✓            | ✓                   |              |         | KERSTEN ET AL 2008, S.46  |
| QTSculptor       | Polygon Technology GmbH | DA                    |               |                |                    |                |           |              | ✓                   | ✓            |         | KERSTEN ET AL 2008, S.47  |
| AECVIZ           | Torna-do Technologies   | DA                    |               |                |                    | ✓              |           |              |                     |              |         | KERSTEN ET AL 2008, S.50  |
| TrueView/Space   | Leica                   | SY                    |               |                |                    | ✓              |           |              |                     |              |         | KERSTEN ET AL 2008, S.50  |
| 3D Studio Viz    |                         | DA                    |               |                |                    | ✓              |           |              |                     |              |         | KERSTEN ET AL 2008, S.50  |
| Highlight Pro    |                         | DA                    |               |                |                    | ✓              |           |              |                     |              |         | KERSTEN ET AL 2008, S.50  |
| LupoScan         | Lupos3D                 | DA                    | ✓             | ✓              |                    | ✓              | ✓         |              |                     |              |         | KOLBE 2010, S.41  |
| Ri-scan Peo      | Riegel                  | DA                    | ✓             |                |                    |                |           |              |                     |              |         | HUANG ET AL 2010, S.611;<br>KERSTEN ET AL 2015, S.83            |

Unter Berücksichtigung der Vielzahl an Weiterverarbeitungsprogrammen und deren vielseitigen Funktionen ist die notwendige Bearbeitungs- und Rechenzeit eine weitere wichtige Größe um sich für ein geeignetes Programm zu entscheiden. Das Verhältnis zwischen Aufnahme- und Weiterverarbeitungsaufwand liegt bei 1:5 bis 1:10, wobei selbst der zehnfache Aufwand regelmäßig überschritten wird (MARBS 2003, S.7).

### 4.1.4 Vorliegende Untersuchungen

Innerhalb der zur Verfügung stehenden Literatur zum Thema des terrestrischen Laserscannings existiert eine Vielzahl von Themenschwerpunkten. Mit den Grundlagen der Laserentstehung und den unterschiedlichen elektronischen Distanzmessverfahren beschäftigen sich beispielsweise JOECKEL ET AL. 2008 ausführlich. Weitere Grundlagen im Bereich des terrestrischen Laserscannings behandelt SCHNEIDER 2008 in seiner Dissertation. Erkenntnisse zum Themengebiet der Standpunktplanung legt WUJANZ ET AL. 2016 in einem Beitrag zur DVW-Schriftenreihe dar. KERSTEN ET AL. 2008 beschreiben die Vorgehensweise von der Datenerfassung bis zur Visualisierung und erläutern verschiedene Scannermodelle. Ergänzt wird dieser Themenkomplex im Jahr 2015 durch KERSTEN ET AL. hinsichtlich neuer Erkenntnisse zur Registrierung und Georeferenzierung sowie Filterung und Dreiecksvermaschung. Weiterhin werden in diesem Tagungsband Kriterien für Laserscanner vorgestellt. Mit dem Thema der Dreiecksvermaschung bzw. Triangulation von Punktwolken beschäftigt sich auch BUCHBACH 2012. In der Bachelorarbeit von NOTH 2012 werden die notwendigen Arbeitsschritte für eine 3D-Visualisierung auf Grundlage einer Punktwolke am Beispiel einer Altstadt verdeutlicht. BÖHLER ET AL. 2002 untersuchen in ihrem Forschungsprojekt verschiedene Laserscannermodelle im Hinblick auf ihre Genauigkeit und Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Architektur, Denkmalpflege und Archäologie, um eine möglichst effiziente Bestandsdokumentation zu erreichen. Im Ergebnis wurden neue Prüfverfahren entwickelt, um die Genauigkeit verschiedener Scanner zu vergleichen und zu bewerten. Der Bereich der Genauigkeitsuntersuchung und die hierzu gehörenden Prüfverfahren werden in dem Bericht von LINDSTAEDT ET AL. 2012 genauer behandelt. An dieser Stelle werden die genauen Messabweichungen von unterschiedlichen Geräteherstellern und Messverfahren ermittelt und bewertet.

Ein Weiterer Schwerpunkt im Bereich des terrestrischen Laserscannings beschäftigt sich mit der Eignung für die Untersuchung von flächigen Vegetationsaufnahmen. Der Beitrag von PRETZSCH, SEIFERT U. HUANG 2011 befasst sich mit dem Potential des TLS im Hinblick auf die Gewinnung von forstinventurbedingten Parametern wie beispielsweise automatische Artenerkennung oder Entwicklungsanalysen. Das Themengebiet der Baumaufnahmen wird in der Diplomarbeit von GRAFL 2012 vertieft. In diesem Zusammenhang wurden Waldgebiete mittels TLS aufgenommen und Einzelbäume mit Hilfe verschiedener Algorithmen extrahiert. Anschließend wurden die extrahierten Bäume zur Durchführung einer Forstinventur vereinfacht und abstrakt dargestellt, um wichtige Parameter

wie Festmeter oder Biomasse zu ermitteln. BIENERT 2013 vertieft das Anwendungsgebiet von TLS in der Forstwirtschaft. Besonderer Schwerpunkt liegt hier bei der Vorstellung von verschiedenen Algorithmen zur automatischen Baumerkennung. Seit mehreren Jahren finden regelmäßig Veranstaltungen wie beispielsweise die Oldenburger 3D-Tage statt, in denen Schwerpunkte rund um das Thema 3D-Messtechnik behandelt werden.

## **4.2 3D-Computer Visualisierung**

Im Themenkomplex der 3D-Computervisualisierung wird für die Erarbeitung wichtiger Grundlagen nachfolgend auf die Entwicklung und den aktuellen Stand der Technik, Faktoren der menschlichen Wahrnehmung bei der Informationsvermittlung von Bildern und vorliegenden Untersuchungen zum Thema der 3D-Gehölzvisualisierung eingegangen.

### **4.2.1 Entwicklung und Stand der Technik**

*„Der Computer stellt die bisher modernste Entwicklung der Medien dar“* (SEIFERT 2009, S.9). Seit den 1980er Jahren werden Computer zunehmend durch steigende Effizienz als Informationsmittel in unterschiedlichsten Arbeitsabläufen der Bauindustrie erfolgreich eingesetzt. Mit der Einführung von CAD-Programmen (Computer Aided Design) ist es möglich, Zeichnungen und digitale Modelle für verschiedenste Situationen darzustellen und mittels E-Mail über das World-Wide-Web in binnen von Sekunden an Adressaten zu vermitteln (BAUMGÄRTEL ET AL. 2011, S.1f.). Dank des technischen Fortschritts lässt sich die Vision der digitalen Baustelle als Werkzeug und Methode für das Bauen im 21. Jahrhundert immer konkreter realisieren. Virtuelle Abbildungen der realen Baustelle ermöglichen es, Bauabläufe zu planen, virtuell zu testen und während der Umsetzung zu überwachen (BORRMANN U. GÜNTNER. 2011, S.2). Problemen, wie z.B. verspätete Fertigstellungstermine, Kostenüberschreitungen, mangelnde Abstimmungen zwischen den Baubeteiligten und unzureichende Qualitäten soll damit entgegengewirkt werden (BAUMGÄRTEL ET AL. 2011, S.2). In diesem Zuge rücken Begriffe wie Echtzeitvisualisierung, Virtual Reality oder Augmented Reality immer mehr in den Vordergrund. Der Begriff Augmented Reality findet seit den 1990er Jahren Anwendung (REINWALD ET AL. 2013, S.339) und LAURINI bezeichnete bereits im Jahre 2001 (in ZEILE 2010, S.28) Virtual Reality-Methoden als Werkzeug der Zukunft für die Darstellung neuer baulicher Situationen. HILLER ET AL. (2003, S.1) definieren Echtzeitvisualisierung als eine fotorealistische, real wirkende und interaktive Situationsdarstellung. Der Begriff Virtual Reality ist mit der Echtzeitvi-

sualisierung eng verbunden. Auch er beschreibt die realitätsnahe Übertragung einer Situation in eine computergestützte Simulation. Den entgegengesetzten Ansatz hierzu verfolgt die Augmented Reality. Hier wird versucht, reale Situationen durch das Hinzufügen von neuen Informations- und Inhaltsebenen zu manipulieren. Reale Elemente treten mit Elementen aus dem Computersystem in eine gegenseitige Beziehung (STREICH 2005 in ZEILE 2010, S.28).

Durch die enormen technischen Fortschritte wird das 21. Jahrhundert häufig als digitales Zeitalter bezeichnet (DELVAUX DE FENFFE 2017). Wie die nachfolgende Prognose der STATISTA GMBH (2017a) zeigt, steigt die Anzahl an Virtual Reality Nutzer auch in Zukunft deutlich an.

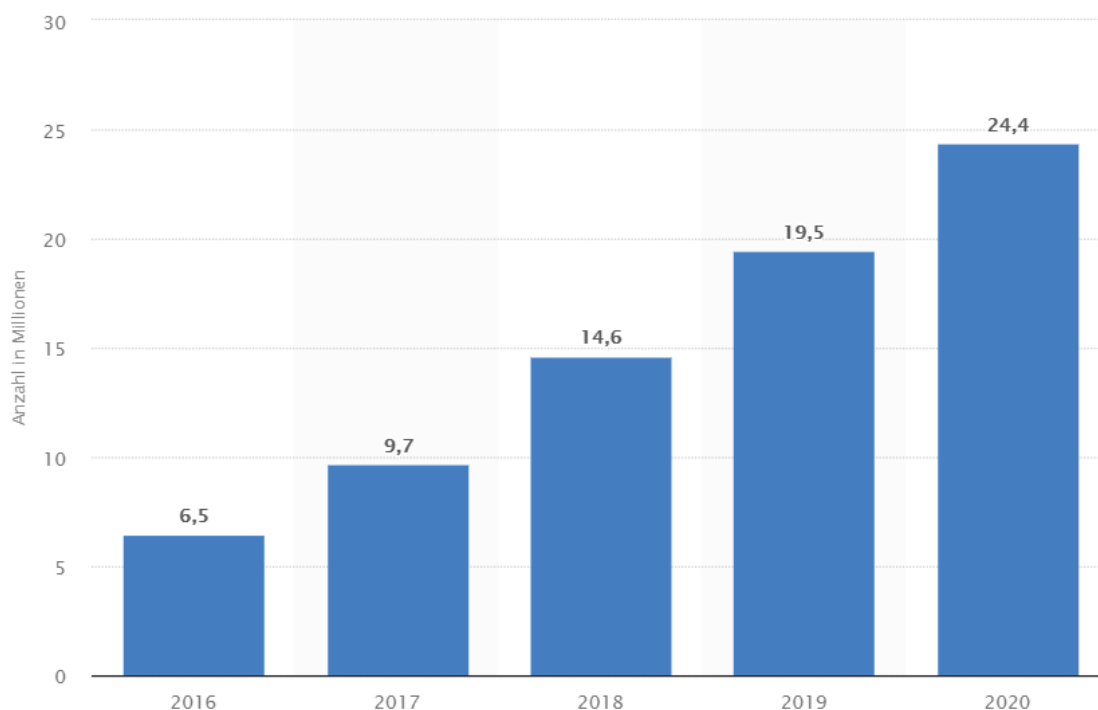


Abbildung 21: Prognose zur Anzahl der Virtual Reality-Nutzer weltweit in Millionen (STATISTA GMBH 2017a)

Nach dieser Prognose steigt die Anzahl der VR-Nutzer um mehr als das Dreifache im Zeitraum von 2016 bis 2020 an.

Mit der Kombination weiterer Medien, wie beispielsweise Text und Ton und der Möglichkeit der Interaktion wird der angestrebte realitätsnahe und vollständige Eindruck als fiktive Realität noch intensiver vermittelt (SEIFERT 2009, S.9f). Sinkende Hardware- und Softwarekosten, eine steigende Anzahl an Fachleuten mit Visualisierungskenntnissen und das zunehmende Wissen über Visualisierungsinstrumente machen den Einsatz von 3D-Computervisualisierungen im Planungsprozess immer attraktiver (LANGE U. HEHL-LANGE 2006 in WISSEN 2007, S.217). 3D-Visualisierungen bieten



zahlreiche Vorteile (MACH U. PETSCHKE 2006, S.8f.; LANGE ET AL. 2004, S.246; VOIGT 2005 in ZEILE 2010, S.6f.; SEIFERT 2009, S.4):

- erstellte Modelle können von mehreren Seiten betrachtet werden
- eine dreidimensionale Betrachtungsweise entspricht der natürlichen Art zu sehen, was ein schnelleres Verständnis von komplexeren Situationsweisen zulässt (z.B. Geländeverläufe)
- Dateninteraktionen werden ermöglicht
- Problemstellen können besser dargestellt werden
- Zeitersparnis durch Vermeidung von Missverständnissen
- eindeutige Qualitätsdefinition möglich
- Erzielung einer hohen Aussagekraft
- bessere Inhaltsvermittlung gegenüber Laien → Verbesserung der Vorstellungskraft
- Extraktion von Konstruktionsdaten möglich
- Präsentationsvorteile mit besseren Verkaufschancen
- Planungsfehler und Kostenüberschreitungen werden vermieden
- räumlich-funktionale Beziehungen werden durch sichtbare und nicht-sichtbare Indikatoren dargestellt
- Beteiligte werden in den Planungsprozess frühzeitig eingebunden
- Funktion der Entscheidungshilfe, Qualitätssicherung und Bewusstseinsbildung

Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht den Entwicklungsprozess von Virtual Reality- Methoden im Laufe der Jahre.

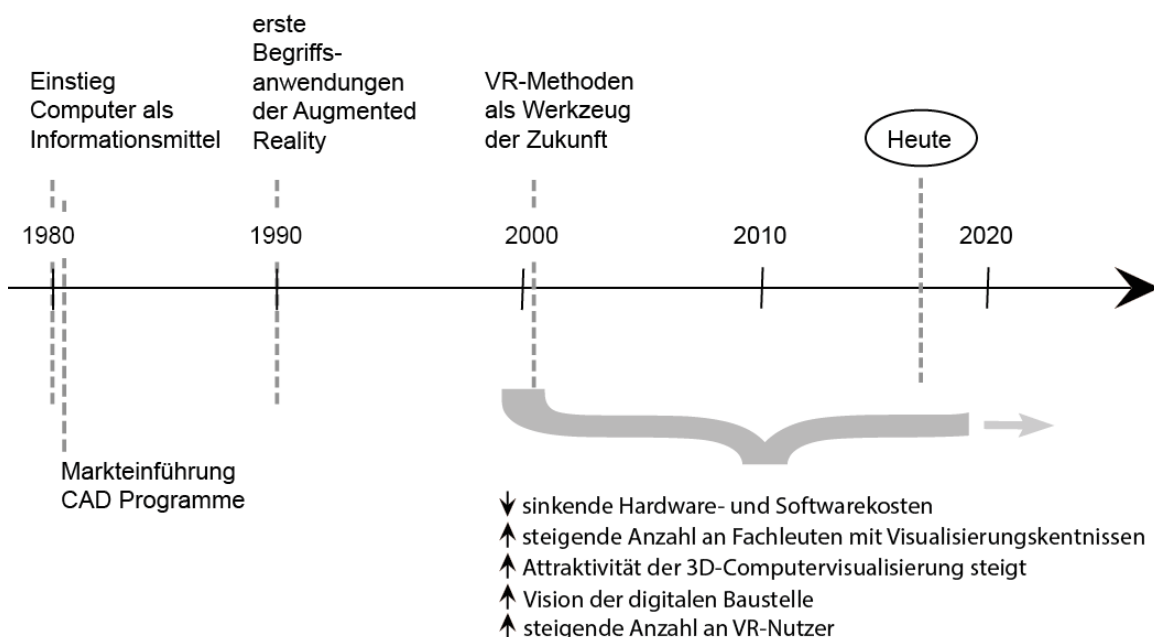


Abbildung 22: Entwicklungsprozess der Virtual Reality-Methoden (zusammengefasst nach BAUMGÄRTEL ET AL. 2011, S.1f.; LAURINI in ZEILE 2010, S.28; LANGE U. HEHL-LANGE 2006 in WISSEN 2007, S.217; STATISTA GMBH 2017a)



Infolge der Dominanz moderner visueller Medien ist die Präferenz visueller Informationen eine logische Konsequenz (McLUHAN 1964 in SEIFERT 2009, S.9), wodurch die Bildkommunikation (Informationsvermittlung mittels Bilder) immer mehr der Sprachkommunikation vorgezogen wird (SEIFERT 2009, S.9). Mit dieser Bewegung gewinnt zu Beginn der Jahrtausendwende die Ableitung von 3D-Stadtmodellen zunehmend an Bedeutung, um Aufgabenstellungen wie die Beurteilung von Veränderungen, Modellierungen, Vorhersagen von Naturereignissen, virtuelle Besichtigungstouren für touristische Zwecke etc. zu bewerkstelligen (JANSA U. STANEK 2003, S.262). Auch Grünflächen und somit Landschaftsvisualisierungen bilden einen integralen Bestandteil im Planungsprozess (WISSEN 2007, S.217). Gerade in dicht besiedeltem Raum nimmt die Bedeutung von Grünflächen wie Parkanlagen, Quartiersplätzen und begrünten Straßenzügen zu. RAABE ET AL. (2015, S.323) sehen das städtische Grün sogar in Gefahr. Aufgrund klimatischer Veränderungen steigen die Anforderungen an Stadtbäume, was eine gezieltere standort- und funktionsgerechte Auswahl dringlicher werden lässt. Durch die Anwendung von Augmented Reality-Technologien in der Bepflanzungsplanung können die visuellen Unterschiede, hervorgerufen durch die Wahl unterschiedlicher geeigneter Gehölz- oder Baumarten, durch Echtzeit-Computervisualisierungen dargestellt werden. Folglich kann beispielsweise jeder Bürger im Rahmen eines öffentlichen Beteiligungsverfahrens über seinen Präferenz-Baum abstimmen (RAABE ET AL. 2015, S.323). Mit der Entwicklung von mobilen- und GIS-unterstützten Daten gewinnen virtuelle 3D-Modelle somit auch zunehmend im allgemeinen, gesellschaftlichen, kulturellen und alltäglichen Kontext an Bedeutung. Visuelle Geodaten in einem Virtual Global System (virtuelles globales System) zu betrachten bringt nicht nur einen gewissen Spaßfaktor mit sich, sondern vereinfacht die Vermittlung von Wissen und führt dargestellten Thematiken einen wissenschaftlichen, finanziellen oder zumindest ideellen Mehrwert zu (ZEILE 2010, S.1).

Landschaftsvisualisierungen und Modellierungen finden auch im Bereich der Forstwirtschaft Anwendung. Waldlandschaften bis zu 25 km<sup>2</sup> Größe werden mittels interaktiven Bewegungen durch und über Landschaften aus Einzelbäumen in Echtzeit dargestellt. Zusätzlich ist eine Simulation der Veränderung der Waldstruktur mit der Zeit realisierbar (SEIFERT 2009, S.4). Die Grundlagendaten werden im Regelfall mittels an Flugzeugen angebrachten Laserscanner aufgezeichnet (ALS, vergleiche hierzu 4.1.1).

Trotz des heute fortgeschrittenen Entwicklungsstandes im Bereich der Computergrafik sind in vielen Bereichen noch Optimierungen möglich. Ein wesentliches Problem stellen die teilweise großen Datenmengen dar und die Möglichkeit, diese in vertretbarer Geschwindigkeit realitätsnah darzustellen (SEIFERT 2009, S.29). Wichtiger Impulsgeber für den Fortschritt der technischen Visualisierung von 3D-Objekten ist die Computerspieleindustrie (ZEILE 2010, S.6). Häufige Ausgangsbasis für die Erstellung von virtuellen Modellen sind 3D-Punktwolkendaten (LAFARGE ET AL. 2010 in RICHTER U. DÖLLNER 2011, S.146), z.B. aus Laserscanning-Aufnahmen. Wichtiger Grundstein für die Darstellung solcher Objekte als fotorealistische Visualisierung ist die in Unterkapitel 4.1.3 näher beschriebene Dreiecksvermaschung, da die Hardwarebasis-Darstellung streng auf Dreiecken aufbaut. Hierfür wird die Oberfläche der Körper in Dreiecke zerlegt und durch diese dargestellt (SEIFERT 2009, S.30). Neben der Dreiecksvermaschung besteht die Option, die Punktwolke aus der Laserscan-Messung als reine Punktwolkenvisualisierung darzustellen. Die Laserscanpunkte können eingefärbt werden (LEITNER ET AL. 2011, S.8) oder enthalten bereits Farbzuordnungen aus den Scanaufnahmen. Darüber hinaus gibt es punktbasierte 3D-Rendering-Techniken. Hier werden anstelle der Dreiecke Punkte als computergrafische Primitive verwendet (KOBELT U. BOTSCH 2004 in RICHTER U. DÖLLER 2011, S.147).

Heute bietet der Markt über 500 verschiedene Visualisierungsprogramme (vgl. Unterkapitel 4.1.3) an, die ein Spektrum von low-cost bis high-end abdecken (KERSTEN ET AL. 2008, S.51). Erste Versionen gibt es seit den 1970er Jahren (FAVORSKAYA U. JAIN 2017, S.90). Gängige Visualisierungsprogramme sind beispielsweise 3ds Max Design von der Firma Autodesk oder Cinema4D von Maxon. Für beide Programme gibt es eine Vielzahl von Standardapplikationen (Plug-Ins) aus den unterschiedlichsten Bereichen. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über mögliche Einsatzbereiche und Funktionen.

Tabelle 5: Übersicht Beispiele für gängige Visualisierungsprogramme (AUTODESK 2017 a; AUTODESK 2016; MAXON COMPUTER 2017; VISION 4D 2017; RENDERMALL GMBH 2012)

| Informationen / Programm   | 3ds Max Design  | Cinema4D Studio  |
|--|---|--|
| Herstellerfirma  | Autodesk  | Maxon  |
| Aktuelle Version   | 3ds Max Design 2017   | Cinema4D R18   |
| Funktionen   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 3D-Animation</li> <li>- 3D-Modellierung und Texturgestaltung</li> <li>- 3D-Rendering</li> <li>- Dynamik und Effekte</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modellierung</li> <li>- Texturierung</li> <li>- Animation</li> <li>- Rendering</li> </ul>   |
| Einsatzbereiche  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelle</li> <li>- Animationen</li> <li>- Visualisierungen</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Werbung/Design</li> <li>- Architektur</li> <li>- Film</li> <li>- Broadcast</li> <li>- Spiele</li> <li>- Visualisierung</li> </ul>   |
| Beispiele für Plug-Ins im Bereich Gelände- und Landschaftsvisualisierung | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Laubwerk (gebrauchsfertige Pflanzenkits)</li> <li>- Terrain Plugin (generiert , Landschaften aus der realen Welt</li> <li>- Autodesigner (kreative Designsoftware und Modellierer)</li> <li>- xFrog (Pflanzenkit)</li> <li>- VBVisual (Pflanzenkit)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Laubwerk (gebrauchsfertige Pflanzenkits)</li> <li>- Riptide Pro (.OBJ Importer und Exporter)</li> <li>- SurfaceSpread (Scatter-Tool, zum Verteilen von Pflanzen, Bäumen, Personen etc.)</li> <li>- xFrog (Pflanzenkit)</li> <li>- VBVisual (Pflanzenkit)</li> </ul> |

Visualisierungsprogramme und Plug-Ins speziell für die Gehölzdarstellung werden in 4.2.3 intensiver behandelt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Stand der Computergrafik im heutigen Zeitalter weit fortgeschritten ist und eine große Einsatzbandbreite von der Verwendung in der Lehre über den direkten Wissensgewinn in der Forschung bis hin zu partizipativen Entscheidungsprozessen zulässt. Unterschiedlichste Interessengruppen können sich mit Hilfe von Computervisualisierungen und Simulationen mit potentiellen Änderungen über die Zeit hinweg auseinandersetzen (SEIFERT 2009, S.6). Insbesondere im Architektur- und Planungssektor werden durch die Anwendung von Augmented Reality-Technologien Planungsfehler und Missverständnisse im Kommunikationsprozess (durch Bildkommunikation) vermieden.

### 4.2.2 Faktoren der menschlichen Wahrnehmung bei der Informations-vermittlung von Bildern

Der in 4.2.1 näher beschriebene technische Fortschritt in der Computervisualisierung und die damit verbundene Möglichkeit, Echtzeitsituationen virtuell darzustellen setzen für den Erfolg voraus, dass der Mensch bzw. Betrachter die dargestellten Objekte richtig wahrnimmt. *„Visualisierungen können ihre Aufgabe, Informationen zu kommunizieren, am besten erfüllen, wenn sie in Abstimmung auf die Prinzipien der menschlichen Wahrnehmung erstellt werden.“* (WISSEN 2007, S.89 i. A.a. STROTHOTTE 1998).

Der Mensch nimmt seine Umwelt als visuell dominierendes Wesen vor allem über dessen Aussehen wahr und besitzt eine Begabung zur Bildanalyse und Objekterkennung (SEIFERT 2009, S.4). Somit werden visuelle Impressionen anders aufgenommen als Informationen in Textform. *„Im Gegensatz zur Sprache werden Bilder in einer speziellen Gehirnregion ganzheitlich-analog und nach einer räumlichen Logik verarbeitet und gespeichert.“* (WISSEN 2007, S.93 i. A.a. KRZEMINSKI 2001). Grund dafür ist vor allem, dass Bilder und künstliche Darstellungen als real wahrgenommen werden (SEIFERT 2009, S.7). Dies lässt der heute hoch umsetzbare Realitätsgrad von Visualisierungen in Verbindung mit dem direkten Zugang zu den entsprechenden Gehirnzentren durch nicht abgrenzbare Wahrnehmungswirkungen zu (SHEPPARD 1989 in SEIFERT 2009, S.11). Die linke Gehirnhälfte des Menschen ist das Zentrum für Logik, Analyse, Genauigkeit und Fertigkeiten des Lesens, Schreibens und Sprechens (McLUHAN UND POWERS 1989 in SEIFERT 2009, S.8). Die Verarbeitung von Informationen erfolgt hier schrittweise und sequentiell (ALEXANDER 2013, S.5). Eine synchrone, qualitative und schnellere Informationsverarbeitung findet wiederum in der rechten Gehirnhälfte statt. Hierzu zählen ebenfalls kreative, musikalische und akustische Fertigkeiten sowie emotionale und intuitive Fähigkeiten, die einen eventuell unmittelbaren Zugang zu visuellen Informationen erklärt (McLUHAN UND POWERS 1989 in SEIFERT 2009, S.8) und somit das Erkennen und Verarbeiten von Bildern auf der Basis von individuellen, emotionalen Erfahrungswerten zulässt (ALEXANDER 2013, S.5). Deswegen wird die Computervisualisierung als modernes Medium zur Vermittlung komplexer Sachverhalte genutzt (SEIFERT 2009, S.4). Visuelle Informationen führen zu einer deutlich besseren Merkfähigkeit (KROEBER-RIEL 1996 in SEIFERT 2009, S.7). Wie oben erwähnt, sollen Computervisualisierungen Bildfunktionen übermitteln, die die Wahrnehmungs- und Handlungsmuster der Betrachter unterstützen. Hierzu zählen nach WEIDENMANN 2002 (in WISSEN 2007, S.99f) und WISSEN (2007, S.107ff.) folgende Hauptfunktionen:

Tabelle 6: Hauptfunktionen der Bildübermittlung (nach WEIDENMANN 2002 in WISSEN 2007, S.99f und WISSEN 2007, S.107ff.)

| Hauptfunktion<br>Auswirkung | Ziel  | Aktivität  |
|-----------------------------|---|--|
| Motivationsfunktion         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufmerksamkeit erzeugen</li> <li>- Ansprechen von Emotionen</li> <li>- Erhöhung des Bewusstseins</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bild als Aufmerksamkeitsgarant</li> <li>- Aufmerksamkeit fokussieren</li> </ul>   |
| Zeigefunktion               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufmerksamkeit auf relevante Merkmale lenken</li> <li>- komplexe Sachverhalte ordnen</li> <li>- klare und eindeutige Vermittlung von Informationen</li> <li>- Vermeidung von Missverständnissen</li> <li>- räumliche Strukturen und Beziehungen aufzeigen</li> <li>- Aussagen leicht merkbar machen</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- erkennen: Entnahme von Inhalten</li> <li>- erinnern und behalten</li> </ul>   |
| Situierungsfunktion         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- aufzeigen des räumlichen und inhaltlichen Kontext</li> <li>- Betrachter in die Situation involvieren</li> <li>- Betrachtung aus unterschiedlichen Perspektiven</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Szenario aktivieren</li> </ul>  |
| Konstruktionsfunktion       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- über Elemente und Zusammenspiele informieren</li> <li>- durch Simulation Vorstellungshilfe verstärken</li> <li>- Prozesse antizipieren</li> <li>- bei Vergleichen unterstützen</li> <li>- vorhandenes Wissen integrieren</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- verstehen</li> <li>- Vorstellungen entwickeln</li> <li>- vergleichen</li> <li>- überprüfen</li> <li>- kognitive Muster aufbauen/ vervollständigen</li> <li>- Meinungen bilden</li> <li>- individuelle Entscheidungen treffen</li> </ul> |

Insbesondere die Konstruktionsfunktion spielt bei dem Wiedererkennen von Elementen eine bedeutende Rolle. Motivations- und Zeigefunktionen dienen dazu, dass allgemeine Interesse des Betrachters zu wecken.

Nachfolgend werden einige Faktoren beschrieben, die im Zuge der Erstellung von Computervisualisierungen berücksichtigt werden können, um das Aufnehmen visueller Informationen und die oben genannten Funktionen gezielt zu unterstützen:

### **Größe**

Durch die Wahl verschiedener Größen und Proportionen können unterschiedliche Elemente voneinander abgehoben werden und quantitative Werte repräsentieren (WISSEN 2007, S.90f). Bekannte Größen wie Menschen oder Tiere können zudem einen Hinweis für den Maßstab geben. Eine gezielte Platzierung im Vorder-, Mittel- oder Hintergrund kann ebenfalls ein Raumbtiefen- und Größengefühl vermitteln (Tuftte 2002 in WISSEN 2007, S.90).

### **Helligkeitswert**

Auch der Helligkeitswert bietet eine Option, verschiedene Elemente voneinander abzuheben. Helligkeitswerte besitzen wie Größenzuordnungen den Vorteil, dass sie sich ohne Legende ordnen lassen (Tuftte 2002 in WISSEN 2007, S.90).

### **Farbe**

Die Farbe besitzt die Funktion der Signalgebung und hebt Objekte vom Hintergrund durch einen Kontrast ab (GOLDSTEIN 1997 in WISSEN 2007, S.91). Dadurch wird die Aufmerksamkeit auf die wichtigsten Bildteile gesetzt (ALEXANDER 2013, S.83). Außerdem ist die Farbe ausschlaggebend für den Helligkeitswert. Grün, Gelb und Orange besitzen zum Beispiel einen hohen und Magentarot, Cyanblau und Violettblau einen niedrigen Helligkeitswert (BERTIN 1982 in WISSEN 2007, S.91). Insgesamt sind dem Sehorgan mit den Farben Schwarz, Orangerot, Grün, Violettblau, Gelb, Magentarot, Cyanblau und Weiss acht Grundfarben als extreme Farbempfindungen möglich (KÜPPERS 2004 in WISSEN 2007, S.91). Dabei vermittelt jede Farbe eine spezielle Symbolik. Grün beispielsweise transportiert ein Gefühl der Kühle und steht als Signal in direkter Verbindung mit dem Thema Natur (HELLER 1989 in ALEXANDER 2013, S.21).

### **Muster**

Mit Muster können unterschiedliche Flächen mit gleicher Sichtbarkeit getrennt werden. Weiterhin bieten Muster z.B. durch unterschiedliche Strichstärken oder Richtungsänderungen Ordnungsschemata und lassen sich gut mit Helligkeitswerten kombinieren (BERTIN 1982 in WISSEN 2007, S.92). Folglich zählen insbesondere Farbe, Größe und Form zu den visuellen Eigenschaften, die der menschliche Sehsinn ohne gezielte Aufmerksamkeitslenkung sofort wahrnimmt (HEALEY ET AL. 1995 in ALEXANDER 2013, S.238).

In 4.2.1 wurde bereits die zunehmende Wichtigkeit von Grünflächen hervorgehoben. Deswegen ist es auch bei dieser Thematik entscheidend, durch Landschafts- und Einzelbaumdarstellungen visuelle und ästhetische Informationen zu vermitteln und durch die Berücksichtigung der oben genannten Faktoren und Funktionen in den Köpfen der Betrachter zu verankern.

Speziell für die Landschaftsvisualisierung führt SHEPPARD (1999) in MACH U. PETSCHKE (2006, S.4) fünf grundlegende Prinzipien für eine gelungene Landschaftsvisualisierung auf:

- 1.) Repräsentativer Charakter (Abbildung von typischen/wichtigen Ansichten und Voraussetzungen der Landschaft)
- 2.) Genauigkeit (Simulation des faktischen oder erwarteten Erscheinungsbildes der Landschaft)
- 3.) Optische Klarheit (Erkennbarkeit von Details, Bestandteilen und Gehalt der Visualisierung)
- 4.) Interesse (Weckung und Fesselung von Interesse)
- 5.) Legitimität (Rechtfertigung der Visualisierung und Nachweisbarkeit des Maßes an Genauigkeit in Zusammenhang mit der Glaubwürdigkeit)

Als weiteres Prinzip ergänzen MACH U. PETSCHKE (2006, S.4) die Internettauglichkeit. Die Visualisierungen sollen webbasierte dreidimensionale Inhalte anbieten können und somit massentauglich sein.

Diese Prinzipien gilt es nun auf den Einzelbaum zu übertragen. Hierfür müssen unterschiedliche Pflanzentypen und Pflanzeigenschaften als Basis herausgefiltert werden. Bäume und Pflanzen spezifizieren sich insbesondere durch die Merkmale Wuchshöhe, Wuchsbreite, Wuchsform (Habitus), Blatttextur, Blattfarbe, Blütextur und Blütenfarbe (RAABE ET AL. 2015, S.326f.). SCHILLING ET AL. (2012, S.1) nennen als Identifikationsfaktoren eines Baumes dessen Stamm, Ast- bzw. Zweigstruktur sowie Größenzuordnungen wie Kronenhöhe und Kronen- und Astdurchmesser. Dies sind entscheidende Faktoren, die die topologische Zusammensetzung eines Baumes beschreiben und jeden zu einem Individuum machen. MACH U. PETSCHKE (2006, S.159f.) schreiben, dass das menschliche Auge bei der Komplexität von Vegetationsstrukturen dazu bereit ist, sich auf vereinfachte Modelle einzulassen. Jedoch beziehen sie sich hier auf Vegetationslandschaften wie z.B. den Rand eines Laubwaldes mit komplexen Pflanzengemeinschaften und nicht auf eine Einzelbaumbetrachtung.



Bei der Wahrnehmung und Beurteilung eines Baumes spielt also die genaue Widerspiegelung des Habitus, die vorhandene Ast- und Verzweigungsstruktur, der Stammverlauf und Größenzuordnungen wie Wuchshöhe, Kronendurchmesser und Astdurchmesser eine entscheidende Rolle. Hinzu kommen Details wie Farben und Texturen von Stamm und Blatt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Beispiele für unterschiedliche Habitusformen und Aststrukturen.

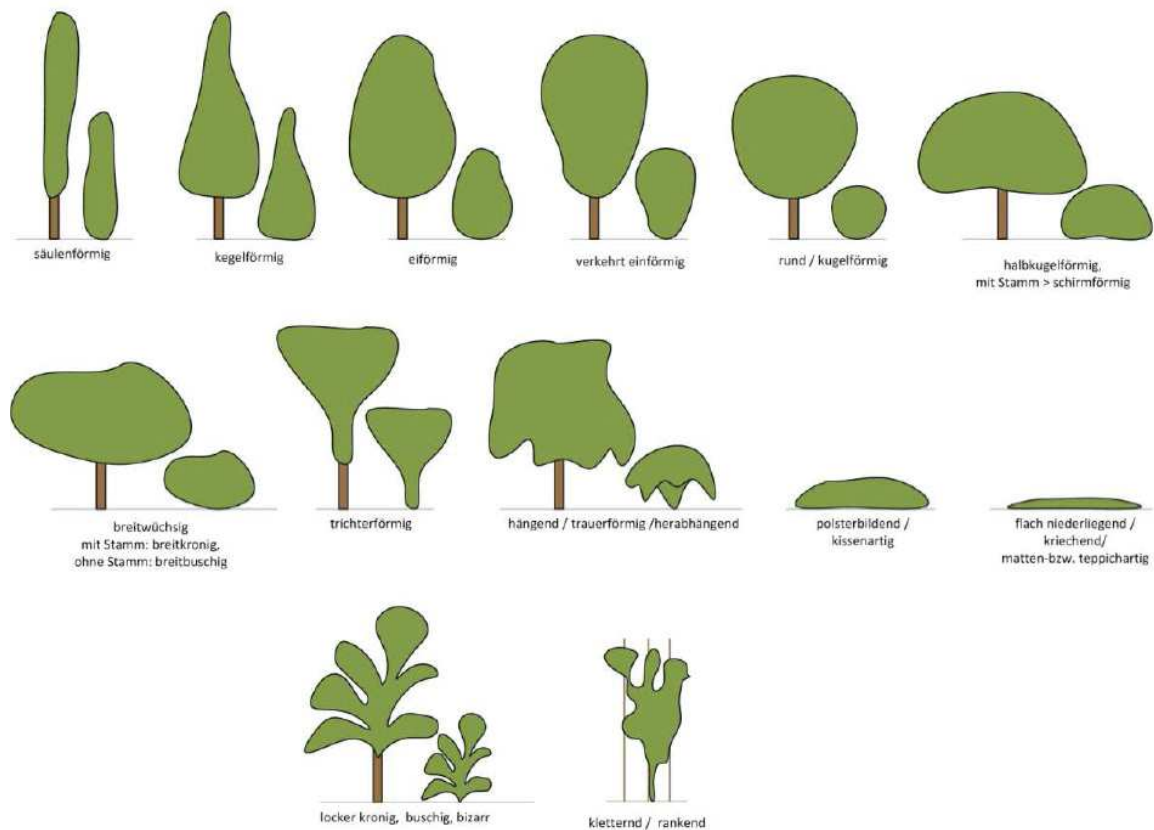


Abbildung 23: Einteilungsmöglichkeiten von Habitusformen in visuelle Typen  
(nach HEINS 2015 in RAABE ET AL. 2015, S.327)

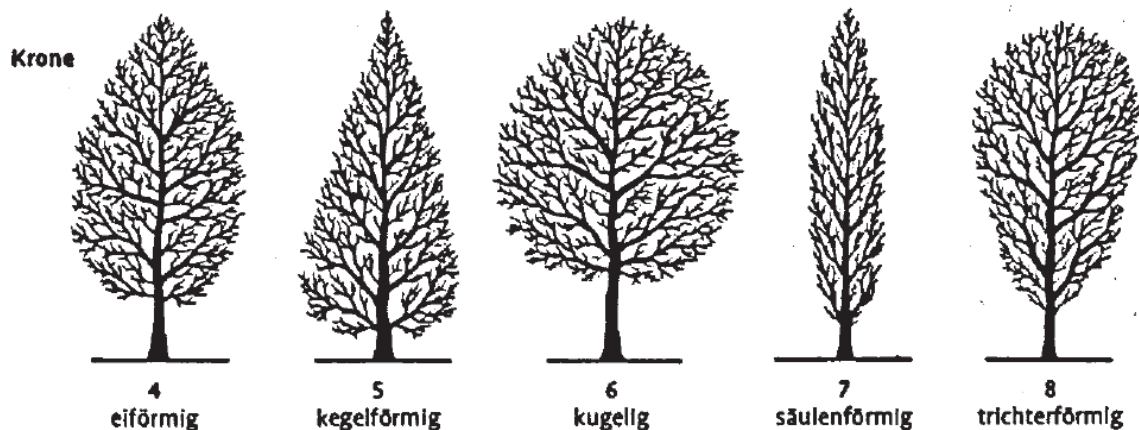


Abbildung 24: Einteilungsmöglichkeiten von Habitusformen mit möglichen Aststrukturen (nach ROLOFF U. BÄTELS 2014, S.13).

Um eine möglichst real wirkende, interaktive Darstellung von Landschaftsdaten zu bieten ist es wichtig, eine virtuelle Ansicht aus der Ich-Perspektive eines Menschen zu gewährleisten (HILLER ET AL. 2003, S.1). Der Betrachter fühlt sich dadurch eins zu eins in die Szene hineinversetzt und entwickelt zum Beispiel Vorstellungsvermögen über den Maßstab und räumliche Auswirkungen von Objekten. Durch eine gegebene Interaktivität kann der Betrachter zudem selbst den Blickwinkel auswählen und das dargestellte Objekt aus unterschiedlichsten Perspektiven betrachten (KERSTEN ET AL. 2015, S.87).

### 4.2.3 Vorliegende Anwendungen und Untersuchungen in der 3D-Gehölzvisualisierung

Damit Echtzeitcomputervisualisierungen oder Virtual Reality-Darstellungen realitätsnahe umgesetzt werden können, ist die Darstellung von Vegetation ein wichtiger und unumgänglicher Grundbaustein. Anwendungsfälle und Einsatzbereiche können hier individuell sein. Im Bereich der Bauungsplanung beispielsweise spielt die Vegetation eine untergeordnete Rolle und fungiert als unterstützendes Element, um die Wirklichkeit zu untermauern. Im Rahmen einer Garten- oder Landschaftsplanung im privaten und öffentlichen Sektor besteht wiederum ein stärkerer Anspruch, verwendete Pflanzen so realitätsnahe wie möglich darzustellen (MACH U. PETSCHKE 2006, S.160). Die zunehmende Bedeutung von Grünflächen und der damit verbundenen Landschaftsplanung im innerstädtischen wurde in Unterkapitel 4.2.1 thematisiert.

Grundlegend stellt die 3D-Darstellung von Gehölzen in der Computervisualisierung eine große Herausforderung dar. „*Vegetation besteht aus einer chaotischen Ansammlung von Elementen. Diese Elemente können aus sehr komplexen Geometrien bestehen.*“ (MACH U. PETSCHKE 2006, S.159). Damit ein Baum annähernd realistisch dargestellt werden kann, werden Milliarden von Polygonen benötigt, was wiederum enorme Speicherkapazität voraussetzt (MACH U. PETSCHKE 2006, S.158f.). Bei dem Ziel, realitätsnahe Landschaften zu erstellen und deren Entwicklungsprozesse und damit verbunden Problematiken (WISSEN 2007, S.205) aufzuzeigen oder Einzelbäume in ihrer Echtzeitausprägung an beliebigen Orten visuell darzustellen, um Betrachtern wichtige Informationen zu vermitteln, kommt man an der Computervisualisierung von Gehölzen jedoch nicht vorbei. In Unterkapitel 4.2.2 wurde erläutert, welche Funktionen und Faktoren zur gelungenen Informationsvermittlung berücksichtigt werden müssen. Je nach gewünschtem Detaillierungsgrad und Realitätsbezug gibt es unterschiedliche Typen von Pflanzenvisualisierungen. Nach MACH U. PETSCHKE (2006, S.162f.) sind folgende Typen die gängigsten:

- Symbole:

Symbole werden zur Vereinfachung der Visualisierung angewendet. Pflanzen werden durch Grundprimitive wie einen Kegel dargestellt, wodurch sich insbesondere Speicher und Ressourcen sparen lassen.

- Flächendarstellung:

Option 1: Pflanzen werden im Hintergrund einer 3D-Szene als Bild eingefügt.

Option 2: Billboards ermöglichen einen ersten Schritt in Richtung realitätsnahe Darstellung, indem eine Fläche erstellt wird, die mit dem Bild eines freigestellten Baumes oder einer Pflanze versehen wird.

- Volumendarstellung:

Hier wird je nach Anforderungen die Pflanze bis zum einzelnen Blatt modelliert. In Abhängigkeit von der Detailgenauigkeit lassen sich fotorealistische Pflanzen generieren.

Zudem führt SEIFERT (2009, S.88) noch sogenannte Cross-Trees auf. Hier wird nichtmehr nur eine Textur in einer Ebene sondern zwei oder mehr Texturen in mehreren Ebenen dargestellt. Im Vergleich zu den oben aufgeführten Billboards nimmt der Realitätsgrad zu. Durch die Verwendung mehrerer Bilder eines Baumes aus verschiedenen Blickwinkeln lässt sich der Ansatz noch verbessern (MEYER ET AL. 2001 in SEIFERT 2009, S.88). Aufgrund der hohen Detaillierungsanforderungen an 3D-Gehölzvisualisierungen zur realitätsnahen Darstellung kommen für diese Zwecke nur Volu-

mendarstellungen in Frage. „Bei den Volumendarstellungen geht es darum, 3D-Modelle in einem 3D-Programm möglichst real zu modellieren.“ (MACH U. PETSCHKE 2006, S.169). Entweder werden die Gehölzmodelle aus Polygonen, Freiformflächen oder Patches manuell erstellt oder prozedural mit entsprechenden Algorithmen erzeugt. Die prozedurale Erstellung basiert auf Berechnungsgrundlagen zur Simulation von Pflanzenwachstum (MACH U. PETSCHKE 2006, S.169).

In der nachfolgenden Tabelle sind einige Visualisierungsprogramme aufgelistet, die sich insbesondere mit Landschaftsvisualisierungen und Pflanzenmodellierungen auseinandersetzen. Es gibt reine Modellierungswerkzeuge und vorgefertigte Bibliotheken, die meist in gängigen Formaten vorliegen und in Anwendungen einfach importiert werden können. Weiterhin gibt es Programmtools als Plug-In für 3D-Visualisierungssoftwares.

**Tabelle 7:** Mögliche Visualisierungsprogramme für Landschaftsvisualisierungen (FAVORSKAYA U. JAIN 2017, S.90ff.; STELZL ET AL. 2006, S.642; WISSEN 2007, S.43; SEIFERT 2009, S.141; IDV INC. 2016; ONYX COMPUTING, INC. 2017a; MARLIN STUDIOS 2016a.; E-ON SOFTWARE, INC. 2017a; NGPLANT O.J.B; ALPHAPIXEL LLC 2017; ACT-3D B.V. 2012; XFROG 2017a; LAUBWERK GMBH 2011a; RENDERMALL GMBH 2012a)

| Programm<br>Informationen                  | Hersteller                                 | Funktionen/Plug-Ins Landschaftsvisualisierung  |
|--|--|--|
| <b>Allgemeine Visualisierungsprogramme</b> |  |  |
| Cinema 4D Studio                           | Maxon                                      | Funktionen siehe Unterkapitel 4.2.1<br>- z.B. Standard-Applikation „Xfrog“ als prozeduraler 3D-Modellierer für Bäume, Pflanzen und Natureffekte.   |
| 3ds Max Design                             | Autodesk                                   | Funktionen siehe Unterkapitel 4.2.1<br>- z.B. Standardapplikation Xfrog, Laubwerk,...  |
| <b>Landschaftsvisualisierungsprogramme</b> |  |  |
| SpeedTree Studio (Version V8)              | Interactive Data Visualization, Inc. (IDV) | - Werkzeugkasten zur Erstellung/ Modellierung von 3D-Pflanzen für Spiele, Animationen, visuelle Effekte etc.<br>- Echtzeitrendering<br>- Pflanzenbibliothek (Nadelbäume, Koniferen, Unterwasserpflanzen, Palmen, Kakteen, Sträucher und Blumen) → insgesamt ca. 175 verschiedene Modelle (kostenpflichtig) |

Beispielmodelle:



Abbildung: Beispielmodell Speedtree – White Oak Species Pack (IDV Inc. 2017)

|           |                |   |
|-----------|----------------|---|
| Onyx Tree | Onyx Computing | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prozedurale Vegetationsmodellierung /3D-Pflanzen-Ersteller</li> <li>- 6 Kategorien (Bambus, Nadelbäume, Koniferen, Blumen, Rasen/Gräser, Palmen)</li> <li>- Pflanzenbibliothek → insgesamt ca. 400 verschiedene Modelle (kostenpflichtig)</li> <li>- Export-Formate: .3ds, .c4d, .lwo, .obj, .dxf, .fac</li> </ul> |
|-----------|----------------|---|

Beispielmodell:

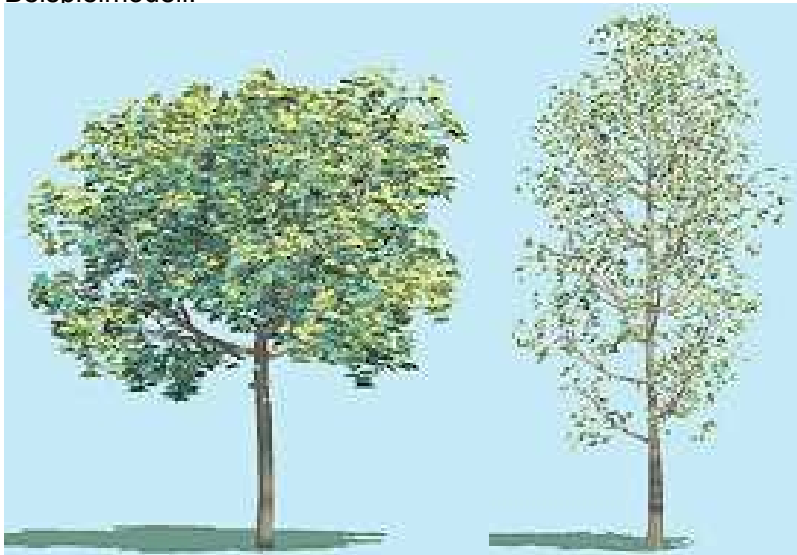


Abbildung : Beispielmodelle Onyx Tree (ONYX COMPUTING, INC. 2017b)

|          |                |   |
|----------|----------------|---|
| TreeFarm | Marlin Studios | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Softwaretool mit über 1500 Bäumen (mit Blatttexturen) (Großteil kostenpflichtig)</li> <li>- handgefertigte und natürliche 2D und 3D-Objekte</li> <li>- Export-Formate: .max, .obj, .lwo</li> </ul> |
|----------|----------------|---|



Beispielmodell:

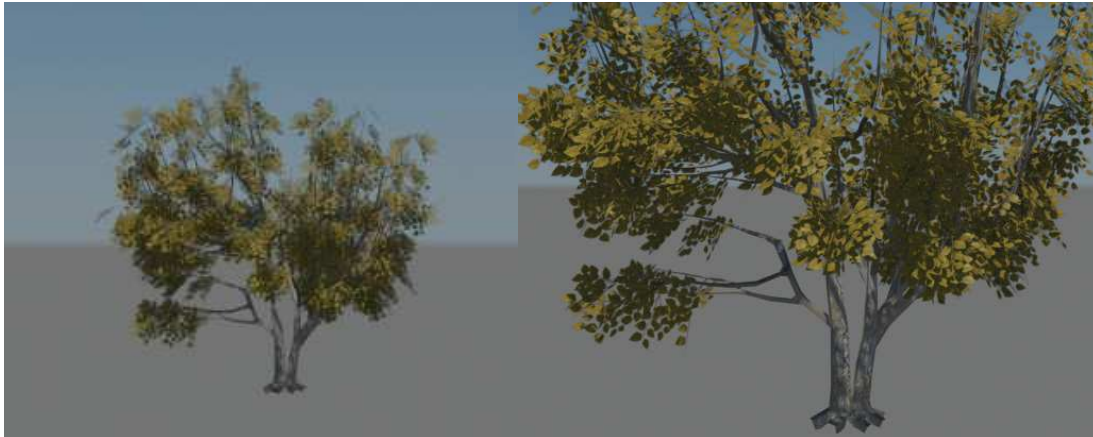


Abbildung : Free TreeFarm sample model, decidus sample, gerendert in 3ds Max Design Version 2015 (MARLIN STUDIOS 2016b)

|                   |               |  |
|-------------------|---------------|--|
| PlantFactory 2016 | E-on Software | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Softwaretool zur Erstellung und Präzisierung von 3D-Pflanzen</li> <li>- 3D Vegetations-Modellierungs-, Animations- und Rendering-Software</li> <li>- Pflanzenbibliothek → insgesamt ca. 290 verschiedene Modelle</li> <li>- Export-Formate: .3ds, .obj, .c4d, .lwo, .abc, .fbx</li> </ul> |
|-------------------|---------------|--|

Beispielmodelle



Abbildung : Quercus robur (E-ON SOFTWARE, INC. 2017b)

|          |  |   |
|----------|--|---|
| Ng Plant |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Open Source Software für Pflanzenmodellierung</li> <li>- Generierte 3D-Pflanzenmodelle als Applikation S</li> <li>- kostenloses Softwareprojekt</li> </ul> |
|----------|--|---|

Beispielmodelle:



Abbildung : Archiv Models, Oak and Maple Tree (NGPLANT o.J.a)

|                                     |                              |   |
|-------------------------------------|------------------------------|---|
| Visual Nature Studio<br>(Version 3) | AlphaPixel<br>LLC            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Animations- und Visualisierungssoftware<br/>→ fotorealistische Darstellungen</li> <li>- Import von GIS und raumbezogenen Daten</li> </ul>  |
| (Scene Express)<br>Version 2        | AlphaPixel<br>LLC / 3DNature | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Add On Tool für Visual Nature Studio</li> <li>- Ermöglicht Export in andere Formate</li> </ul>   |
| Quest3D                             | Act-3D B.V.                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Softwaretool zur Echtzeitdarstellung und Rendering von Windows-Applikationen</li> <li>- Importmöglichkeiten: .dxf, .3ds, .obj, .dae, .fbx</li> </ul>   |
| <b>Plug-Ins Gehölzdatenbank</b>     |                              |   |
| Xfrog                               | Xfrog Inc.                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- prozeduraler 3D-Modellierer</li> <li>- Pflanzendatenbank mit realistischen, detaillierten, voll texturierten 3D-Bäumen, Sträucher und Blumen</li> <li>- 600 Arten mit insgesamt ca. 3.000 Modellen (Großteil kostenpflichtig)</li> <li>- Kompatibilität u.a. mit: 3dsMax, Cinema 4D, .obj, Maya,...</li> </ul> |



Beispielmodelle:




Abbildung : Xfrog Shop, English Oak and Red Oak (XFROG 2017b)

|          |               |  |
|----------|---------------|--|
| Laubwerk | Laubwerk GmbH | <ul style="list-style-type: none"> <li>- qualitativ hochwertige, flexible Pflanzenkits/3D Modelle</li> <li>- Kompatibilität u.a. mit: 3dsMax, Cinema Maya, SketchUp,...</li> <li>- 11 Ausgaben mit insgesamt ca. 3960 Modellen</li> <li>- Einzelmodelle in unterschiedlichen Jahreszeiten und Altersphasen realisierbar</li> </ul> |
|----------|---------------|--|

Beispielmodelle



Abbildung : Laubwerk – Pflanzenkit 1 und 2, Quercus robur und Quercus rubra (LAUBWERK GMBH 2011b)

|  |                 |  |
|--|-----------------|--|
| VB Visual  | RenderMall GmbH | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 3D Pflanzenmodelle</li> <li>- hohe Qualität, wenige Polygone</li> <li>- Pflanzenbibliothek mit 30 herausgebrachten Pflanzenpaketen → insgesamt über 300 Modelle</li> <li>- gängige Plattformen u.a. Cinema 4D, 3ds Max Design, Vectorworks, Autocad, ...</li> </ul> |
| Beispielmmodelle:<br> |                 |  |
| Abbildung : VB Visual freigestellte Pflanzen, Herbst, Frühling und Sommer (RENDERMALL GMBH 2012b)        |                 |  |

In Unterkapitel 4.2.1 wurden der breite Einsatzbereich und die Bedeutung von Landschaftsvisualisierungen angesprochen. Dieser reicht von der reinen Einzelbaumdarstellung als Planungsgrundlage im Privatbereich über Informationsvermittlungen mit öffentlichen Beteiligungsverfahren für Grünflächen bis hin in den Bereich der Forstwirtschaft, wo Waldvisualisierungen zur Ermittlung von veränderten Strukturen eingesetzt werden.

Neben der reinen Landschaftsvisualisierung spielt auch die Animation und Wachstumssimulation eine zunehmende Rolle. Bei der naturnahen Simulation von Pflanzenwachstum ist man mit Bordmitteln gängiger 3D-Werkzeuge schnell am Ende. Pflanzenwachstumssimulatoren setzen eigene Programmiersprachen und intensive Beschäftigungen mit sogenannten L-Systemen voraus (MACH u. PETSCHKE 2006, S.191), auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Auf dieser Basis entwickelten sich im Laufe der Jahre Wachstumssimulatoren, die in EDV-Programme übertragen wurden. Beispiel hierfür ist der Wachstumsgenerator Silva. Hierbei handelt es sich um ein einzelbaumbasiertes Managementmodell, bei dem der Wald als ein Mosaik von Einzelbäumen verstanden wird. Unter Berücksichtigung der baumindividuellen Standort- und Wuchsbedingungen sowie Konkurrenzfaktoren aus der Umgebung wird für jeden Baum dessen Höhen- und Dickenwachstum prognostiziert.

Entwicklungen können über Jahrzehnte hinweg in 3D-Ansichten betrachtet werden. In der Forstwirtschaft wird Silva als Planungsinstrument eingesetzt, um künftige Waldentwicklungen präzise darzustellen und unter Berücksichtigung natürlicher, ökonomischer und ökologischer Aspekte zu bewerten und erforderliche Maßnahmen abzuleiten (KLEMMT et al. 2004, S.38f.). Ein weiteres System ist der von Silva abgeleitete Simulator Sybilla (FABRIKA UND DURSÝ 2006 in SEIFERT 2009, S.143).

Der in *Tabelle 7* aufgelistete Auszug an Visualisierungsprogrammen deutet die Vielfalt an Programmen an, die sich mit der Darstellung von Gehölzen beschäftigen, was noch einmal die Wichtigkeit der Thematik unterstreicht. Bei der (manuellen) Erstellung von Echtzeit-Modellen mit komplexen Strukturen, wie man sie auch bei Gehölzen aufgrund ihrer Kronenstruktur vorfindet, bezeichnet MARBS (2003, S.2) das Laserscanning als ideale Methode zur Aufnahme. Durch den automatischen Messprozess lassen sich Millionen von Punkten einer Oberfläche aufnehmen und speichern. Mithilfe der erzeugten 3D-Punktwolke lassen sich weitere Parameter wie Länge und Durchmesser von Ästen und Stämmen bestimmen. Diese Größen finden ihre Anwendung insbesondere in der Forstwirtschaft, Hydrologie, Ökologie und Visualisierung (BUKSCH 2011, S.xvii). Einen terrestrischen Laserscanner zur Aufnahme von Bäumen hat beispielsweise GRAFL (2012) in seiner Diplomarbeit verwendet. Ziel der Arbeit war jedoch, eine Methode zu finden, die die Baummodellierung vollständiger und geometrisch korrekter darstellt. Die Baumstruktur soll durch manuelles Nachzeichnen auf Intensitätsplattkarten der TLS-Aufnahmen bewerkstelligt werden (GRAFL 2012, S. II). PRETZSCH ET AL. (2011, S.189f.) nutzen terrestrisches Laserscanning zur Erfassung der Struktur von Baumkronen. Hierdurch soll Wissen über die artspezifische Struktur von Baumkronen und deren Entwicklung (Kronenstrukturdynamik) gewonnen werden. Im Rahmen der Forstwirtschaft werden insbesondere flugzeuggetragene Laserscanner (ALS) eingesetzt. Hieraus gewonnene Daten dienen beispielsweise zu einer flächendeckenden Ableitung von digitalen Gelände- und Kronenmodellen, woraus sich wiederum die Baumhöhe ableiten lässt (BIENERT 2013, S.4). REITBERGER (2010) beschäftigt sich in seiner Dissertation mit der 3D-Segmentierung von Einzelbäumen und Baumartenklassifikation aus Daten flugzeuggetragener Laserscanner. Jedoch lassen sich nicht alle, insbesondere bodennahe, Parameter wie Stammdurchmesser oder Kronenansatzhöhe direkt mittels ALS ermitteln. Somit gewinnt auch die Kombination von ALS und TLS in der Forstwirtschaft zunehmend an Bedeutung (vgl. Unterkapitel 4.1.1) (BIENERT 2013, S.4). BIENERT (2013) befasst sich in ihrer Dissertation mit der automatischen Extraktion von 3D-Baumparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten, während BUKSCH (2011) einen neuartigen Algorithmus, den SkelTre-Algorithmus, zur Extraktion einer Strukturbeschreibung von Bäumen aus 3D-Punktwolken vorstellt. „Diese Strukturbeschreibung

*wird Skelett genannt und beschreibt ein Objekt linienartig.*“ (BUKSCH 2011, S.xvii). PFEIFER ET AL. (2004) beschäftigen sich ebenfalls mit der Einzelbaummodellierung. Ziel ist es auch hier, forstwirtschaftliche Parameter zu generieren. In einem experimentellen Rahmen präsentiert BREMER ET AL. (2012) eine automatische Prozesskette für die Strukturierung und Klassifizierung von TLS-Punktwolken in Äste und Blattwerk. Es erfolgt ein Vergleich der Ast-Extraktion bei belaubtem und unbelaubtem Zustand. HUANG U. PRETZSCH (2010) benutzen terrestrische Laserscanner zur Einschätzung von Blattmassen an Einzelbäumen in einem Wald mit Nadelgehölzen. DEUSSEN (2003) setzt sich in seinem Buch mit der Modellierung von pflanzlichem Bewuchs und der damit verbundenen Bilderzeugung auseinander. BREMER ET AL. (2012) präsentieren in einem experimentellen Rahmen eine automatische Prozesskette für die Strukturierung und Klassifizierung von TLS- Punktwolken in Äste und Blattwerk.

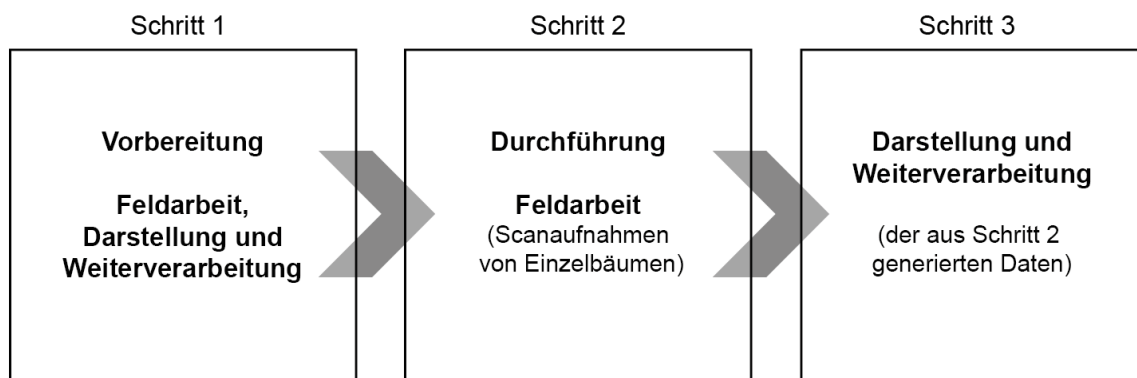
Aus den aufgelisteten Untersuchungen und Anwendungen zum Thema Laserscanning in Verbindung mit Baumdarstellungen wird deutlich, dass mit den jeweiligen Ausführungen immer spezielle Ziele verfolgt werden. Von der Gewinnung inventurbedingter Parameter aus der Forstwirtschaft über stetige Optimierungen automatisierte Verfahrensabläufe bis hin zur speziellen Detailmodellierung werden viele Schwerpunkte innerhalb dieser Thematik behandelt und untersucht. Jedoch hat sich noch keine Arbeit im Wesentlichen damit befasst, einen optimalen Verfahrensablauf von der Einzelbaumaufnahme bis hin zur Einzelbaumvisualisierung, speziell im Kontext Echtzeit-3D-Baummodelle als visualisierungs- und informationsunterstützende Maßnahme in der Garten- und Landschaftsplanung, darzustellen.

## 5 Material und Methoden

In diesem Kapitel wird die allgemeine Vorgehensweise erläutert und der eingesetzte Laserscanner sowie die Untersuchungsobjekte und –gebiete vorgestellt. Darüber hinaus wird ein Vermessungs-Protokoll für den Messvorgang und ein Kriterienkatalog zur Wahl der richtigen Darstellungs- und Weiterbearbeitungssoftware entwickelt.

### 5.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die allgemeine Vorgehensweise lässt sich mit der Vorbereitung, Durchführung der Feldarbeit und Darstellung und Weiterverarbeitung der generierten Punktwolken in drei wesentliche Handlungsschritte unterteilen (vgl. *Abbildung 25*).



*Abbildung 25: Drei wesentliche Handlungsschritte (Begriffsbestimmungen in Anlehnung an AJLANI 2008, S.66).*

Zur Aufnahmemöglichkeit von Objekten wurde im Unterkapitel 4.1.1 auf die verschiedenen Arten von 3D-Laserscanning eingegangen. Airborne Laserscanning (ALS) eignet sich insbesondere für eine großflächige und weniger detailgenaue Objektaufnahme. Eine Anwendung des Mobile Laserscannings (MLS) ist aufgrund einer eingeschränkten Zugänglichkeit innerhalb der Baum-schulflächen, auf denen die Einzelbaumaufnahmen durchgeführt werden, nicht zielführend. Weiterhin können keine detaillierten Scans von ausgewählten Bereichen nach dieser Art aufgenommen werden (DOLD 2010, S.20). Hinzu kommt, dass sowohl ALS als auch MLS durch höhere Reichweitenmessung und zusätzliche GPS-Sensoren größere Aufwandskosten für die Scanneranschaffung und die benötigten Trägergeräte mit sich ziehen und deswegen in keinem ökonomischen Verhältnis zum Gesamtaufwand der Baumaufnahmen stehen.

Diverse Publikationen, die sich mit Einzelbaumaufnahmen beschäftigen zeigen, dass das terrestrische Laserscanning (TLS) das ideale Verfahren für diese Art der Aufnahme darstellt (vgl. Unterkapitel 4.1.4). Folglich wird zur Aufnahme der Einzelbäume ein berührungsloses Distanzmessverfahren



mittels terrestrischem 3D-Laserscanner angewendet (Funktionsprinzip siehe Unterkapitel 4.1.2).

Speziell für Einzelbaumaufnahmen mit dem Ziel einer Echtzeit-Computervisualisierung gibt es keine festgeschriebenen Richtlinien oder optimale, geprüfte Verfahrensanweisungen. Deswegen erfolgt im Rahmen der Vorbereitung (Schritt 1) zunächst eine intuitive Annäherung des Messverfahrens über Probeaufnahmen, um mögliche Standardverfahren und Einstellungsparameter am Ende festzulegen oder richtungsweisende Erkenntnisse für die Aufnahmen im Feld (Schritt 2) zu gewinnen. Für eine umfangreiche Dokumentation wird ein spezielles Messprotokoll für die Baumaufnahme angefertigt. Im Zuge der Probeaufnahmen wird eine Eiche (*Quercus robur*, ca. 12 m hoch) im unbelaubten Zustand mit 2 unterschiedlichen Scanauflösungen aufgenommen. Die erste Scaneinstellung (Auflösung =  $\frac{1}{4}$ , Qualität = 3x) ist die Mindestqualität, die der Scanner für eine Kugelerkennung benötigt und gem. Herstellerangaben mit rund 3 min und 30 sek Scanzeit pro Standpunkt (vgl. Tabelle 9) als niedrig einzustufen. Die zweite Scaneinstellung (Auflösung =  $\frac{1}{2}$ , Qualität = 4x) ist deutlich höher und mit rund 28 min Scanzeit pro Standpunkt (vgl. Tabelle 9) aus erster ökonomischer Einschätzung das maximal Vertretbare. Bei vier Gerätestandpunkten pro Baumaufnahme käme man auf ca. 2 Stunden reine Scanzeit ohne jegliche Umrüstzeit.

Unter Berücksichtigung von Faktoren der menschlichen Wahrnehmung (vgl. Unterkapitel 4.2.2) und messbaren Parametern wie Punktdichte bzw. Punktzahl sollen Erkenntnisse über die wahrnehmbaren Unterschiede und die damit zusammenhängenden Zeitaufwendungen gewonnen werden. Zudem sollen Verfahrensabläufe und Notwendigkeiten beim Messablauf verinnerlicht werden, um bei der Durchführung der Feldarbeit Abläufe wie z.B. Aufbau und Anordnung der Referenzpunkte, Funktionsweise des Scanners, Belichtungsabgleich, Fotoaufnahmen und Aufstellung des Stativs bereits zu kennen. Die gewonnenen Punktwolken aus den Scans dienen nicht nur der Beurteilung der unterschiedlichen Scanauflösungen, sondern können gleichzeitig für die Testung von auf dem Markt verfügbaren Darstellungs- und Weiterverarbeitungsprogrammen eingesetzt werden. Hierfür wird ebenfalls in der Vorbereitungsphase ein Kriterienkatalog entwickelt, mit dem unterschiedlichste Programme auf ihre Funktionen verglichen und beurteilt werden.

Die Hauptdurchführung der Feldarbeit findet auf einem Baumschulgelände statt. Aufgenommen werden 2 Platanen unterschiedlicher Größe (*Platanus acerifolia*, ca. 20 m hoch und *Platanus acerifolia*, ca. 8 m hoch), bei denen die aus den Probeaufnahmen gewonnenen Erkenntnisse berück-

sichtigt und angewendet werden. Insgesamt werden die beiden Platanen zweimal aufgenommen, einmal im unbelaubten Zustand (Frühling, März) und einmal im belaubten Zustand (Sommer, Juni). Eine umfassende Dokumentation erfolgt wieder mithilfe der angefertigten Aufnahmeprotokolle. Bei der Durchführung der Feldarbeit wird vorbehalten, je nach Erkenntnissen aus den Probeaufnahmen, weitere Parameter wie zum Beispiel die Anzahl der Gerätestandpunkte pro Baum zu variieren. Durch die Verwendung gleicher Scaneinstellungen soll die Aufnahme der beiden Platanen stets vergleichbar sein. Die gewonnenen Punktwolken aus der Feldarbeit können ebenfalls für die Beurteilung zur Wahl von Darstellungs- und Weiterverarbeitungsprogrammen verwendet werden.

Im letzten Schritt werden mithilfe des Beurteilungskataloges optimale Programme zur Darstellung und Weiterverarbeitung der Punktwolken herausgefiltert und angewendet, um die gewonnene Punktwolke weiter zu bearbeiten, bis eine Echtzeit-Computervisualisierung des aufgenommenen Baumes möglich ist. Zur Bewertung des Ablaufes, der Qualität und des Aufwand-Nutzungs-Verhältnisses werden die erzielten Ergebnisse mit bestehenden, computergenerierten Gehölzen aus bekannten Gehölzdatenbanken wie z.B. xFrog oder Laubwerk verglichen. Resultierend hieraus können Standardverfahren definiert oder richtungsweisende Verbesserungsvorschläge aus festgehaltenen Erkenntnissen gewonnen werden. Die nachfolgende Grafik stellt die Vorgehensweise grafisch dar.

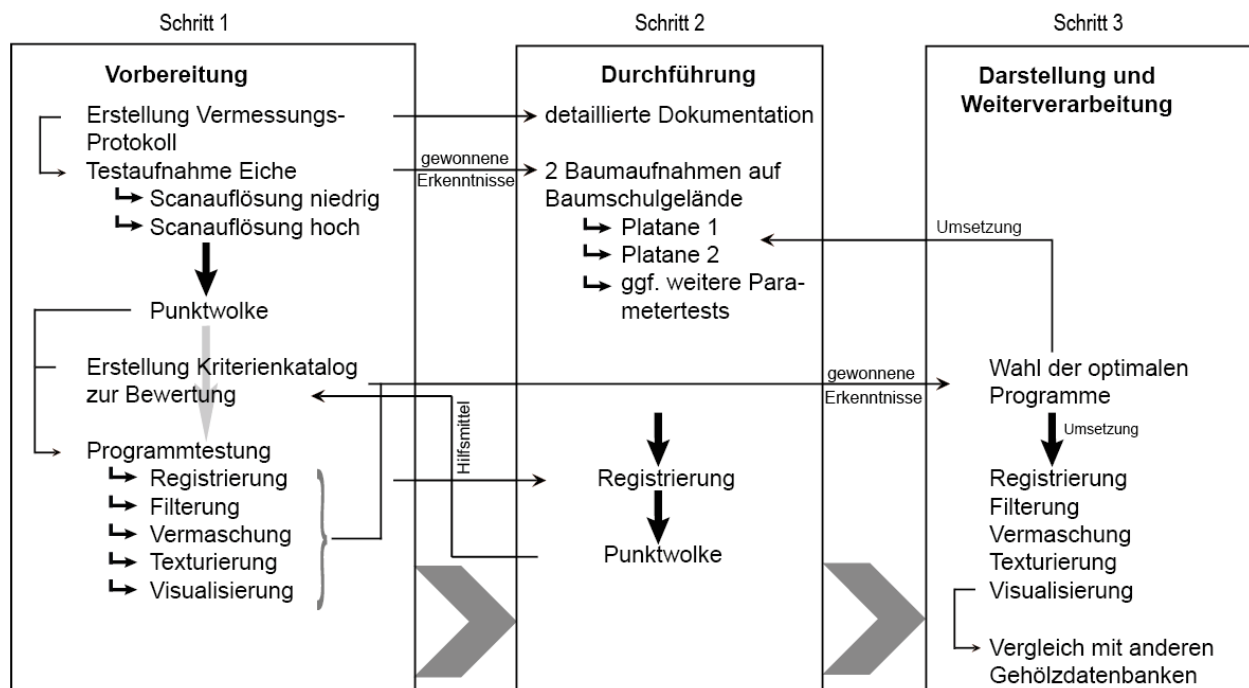


Abbildung 26: Übersicht allgemeine Vorgehensweise



Die Bearbeitungsprozesse werden an einem PC mit folgender Hardware durchgeführt:

Prozessor: Intel® Core™ i5-3470 CPU @3.2GHz (4CPUs), ~3.6GHz

Ram: 8192MB RAM

DirectX-Version: DirectX 11

Grafikkarte Typ: NVIDIA GeForce GTX 650

Grafikkarte Speicher: 4.043 MB

## 5.2 Beschreibung des eingesetzten Laserscanners

Bevor die Probe- und Feldaufnahmen der Einzelbäume durchgeführt werden können, ist es zunächst wichtig, einen 3D-Laserscanner mit dem für Baumaufnahmen optimalen Distanzmessverfahren auszuwählen. Um einen Überblick zu bekommen, sind in der nachfolgenden Tabelle noch einmal die in Unterkapitel 4.1.2 bereits näher erläuterten Messverfahren mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen aufgelistet.

Tabelle 8: Übersicht über Messverfahren und deren Vor- und Nachteile (Zusammenfassung gem. Angaben aus 4.1.2).

| Distanz-messverfahren      | Vorteile  | Nachteile  |
|----------------------------|---|--|
| Impulslaufzeit-verfahren   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- schnelle Streckenmessung mit hoher Auflösung</li> <li>- große Reichweite (bis 2.000m)</li> <li>- eindeutige Streckenmessung in kurzer Zeit</li> <li>- keine systematischen Fehler</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- großer Aufwand im Verhältnis zur Genauigkeit</li> <li>- geringe Datenrate (50.000 Punkte pro Sekunde)</li> <li>- längere Scanzeit</li> </ul>  |
| Phasenvergleichs-verfahren | <ul style="list-style-type: none"> <li>- gut entwickelt, kompakt und kostengünstig</li> <li>- keine Beeinflussung des Messverfahrens durch kurzzeitige Unterbrechungen der Messstrahlen</li> <li>- hohe Datenrate bei der Aufnahme (bis 1 Mio. Punkte pro Sekunde)</li> <li>- hohe Genauigkeit von 2-8mm</li> <li>- kurze Messzeit vor Ort → schnelle und wirtschaftliche Punkterfassung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auftreten systematischer Fehler</li> <li>- aufwendige Optik notwendig</li> <li>- leistungsfähige Stromversorgung notwendig</li> <li>- geringe Reichweite (max. 80 – 100 m)</li> </ul> |
| Triangulations-verfahren   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Genauigkeit im Submillimeterbereich</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- geringe Reichweite (max. 10m)</li> <li>- bei Tageslicht nur eingeschränkt einsetzbar</li> <li>- geringe Scanrate</li> </ul>   |

Das Triangulationsverfahren wird als indirektes Distanzmessverfahren häufig in der Medizin oder generell zur Aufnahme kleinvolumiger Körper im Nahbereich verwendet. Die Messreichweite ist nur auf wenige Meter ausgelegt (BIENERT 2013, S.22f.). INGENSAND 2004 (in JOCKEL ET AL. 2008, S.324) definiert den Nahbereich zwischen 0 bis 4 m. Durch die kurze Reichweite des Triangulationsverfahrens ist es sehr schwierig, einen Baum vollständig mit hoher Messgenauigkeit aufzunehmen, da dieser schnell eine Höhe von 10 m überschreitet. Weiterhin kann der Scanner nicht direkt am Baum positioniert werden, damit alle umliegenden Kugeln für die Registrierung erkannt werden. Hier werden ebenfalls Abstände von 10 m schnell überschritten. Aufgrund der oben aufgeführten Nachteile des Triangulationsverfahrens erfolgt eine Auswahl zwischen dem Impulslaufzeit- und Phasenvergleichsverfahren.

Vergleicht man die Vor- und Nachteile wird schnell deutlich, dass das Phasenvergleichsverfahren höhere Datenraten und Distanzmessgenauigkeiten erzielt. Gerade bei der Aufnahme von Einzelbäumen, welche eine komplexe Struktur mit großen Datenmengen darstellen, sind dies entscheidende Vorteile. Zum einen bringen die Zeitersparnis bei der Aufnahme und die kostengünstigeren Ausführungen enorme wirtschaftliche Vorteile mit sich und zum anderen ist eine hohe Messgenauigkeit aufgrund der dicht verzweigten und teilweise dünnen Aststrukturen unabdingbar. Hinzu kommt der Vorteil, dass kurzzeitige Unterbrechungen zu keiner Beeinflussung des Messverfahrens führen. Ein Nachteil des Phasenvergleichsverfahrens ist die deutlich geringere Reichweite. Jedoch ist eine Reichweite von max. 100 m bei der Aufnahme von Einzelbäumen mehr als ausreichend. Die durch das Phasenvergleichsverfahren auftretenden systematischen Fehler werden durch die Scannersoftware intern beseitigt (vgl. Unterkapitel 4.1.2). Folglich soll der ausgewählte 3D-Laserscanner nach dem Phasenvergleichsverfahren arbeiten.

In Kapitel 4.1.1 ist eine Übersicht dargestellt, die gängige 3D-Laserscanner auf dem Markt abbildet. Nach dem Phasenvergleichsverfahren arbeiten demnach z.B. Laserscanner der Firma Faro und Zoller & Fröhlich. Aufgrund der gegebenen Möglichkeit, einen 3D-Laserscanner von einem ortsansässigen Ingenieurbüro zu verwenden, werden die Aufnahmen mit dem 3D-Laserscanner Faro Focus<sup>3D</sup> S120 durchgeführt.

Die Firma Faro wurde im Jahre 1981 zunächst unter dem Namen Res-Tec gegründet, bevor Sie 1983 den heutigen Namen Faro erhielt. Sie existiert nunmehr seit über 30 Jahren. Zu Beginn

konzentrierte sich die Ausrichtung der Technologien und der dazugehörigen Software auf Operations- und Diagnoseverfahren. Ab 1991 startete Faro dann mit einer Neuausrichtung von 3D-Messungen im Bereich der Fertigung. 2008 wurde erstmals der Faro® Laser Scanner Photon eingeführt. Die von uns verwendete Serie Focus<sup>3D</sup> erschien erstmals im Jahre 2010 auf dem Markt. Heute ist Faro im Bereich der dreidimensionalen Mess- und Bildgebungssysteme ein weltweit führendes Unternehmen (FARO EUROPE GMBH & Co.KG 2017 a). FARO (2013 b, S.1) selbst bezeichnet den Focus<sup>3D</sup> als „[...] ein Hochgeschwindigkeits-3D-Scanner zur detaillierten Messung und 3D-Dokumentation.“ „Ein Innovations- & Effizienzsprung, der Ihre Kosten senkt.“

Er verfügt über folgende Spezifikationen (FARO 2013 a, S.111):

- Reichweite: 0,6 m – 120 m
- Messrate: 122.000 / 244.000 / 488.000 / 976.000 Punkte/Sekunde → Abhängig von gewählter Scanqualität
- Messgenauigkeit: +/- 2 mm
- integrierte Farbkamera mit bis zu 70 Megapixel
- automatische Helligkeitsanpassung / Belichtungsabgleich
- Sichtfeld: 300° vertikal und 360° horizontal durch rotierende Spiegelachse
- Laserleistung (CW): 20 mW (Laserklasse 3R)
- Wellenlänge: 905 nm
- Austritts-Strahldurchmesser: 3,0 mm, kreisrund
- Datenspeicherung: 32-GB-SD-Karte
- Scannersteuerung: Touchscreen, W-LAN, PC-Anschluss möglich
- Akkulaufzeit: bis zu 5 Stunden
- Umgebungstemperatur: 5° - 40° C
- Gewicht: 5,0 kg
- Abmessungen: 240 x 200 x 100 mm
- Wartung/Kalibrierung: jährlich durch den Hersteller durchzuführen (letzte Gerätekalibrierung: 15.01.2016)
- Referenzkugel: 145mm Durchmesser, weiß, Plastik

Ein bedeutender Vorteil des Faro-Laserscanners ist zudem der integrierte Multi-Sensor als „[...] das führende System für die 3D-Dokumentation.“ (FARO 2013 b, S.1). Hierzu zählt nach FARO (2013 b, S.1) ein elektronischer Kompass, der durch automatische Ausrichtungen die automatische Registrierung verbessert, ein Höhenmesser, der entsprechende Höheninformationen zu jedem Scan

liefert, ein Zweiachskompensator, der die Anzahl der zu verwendenden Zielmarken reduziert und ebenfalls zu einer Verbesserung der automatischen Registrierung führt und eine über W-LAN gesteuerte Fernbedienung, die ein steuern der Scans aus der Entfernung zulässt. Wie angedeutet ermöglicht die „[...] *Vielzahl an Sensoren* [...] *einen hohen Automatisierungsgrad in der Nachbearbeitung der Scans.*“ (FARO 2013 b, S.1). Bis zu 50% der Scanzeit sollen im Vergleich zu herkömmlichen Scannern eingespart werden. Durch die zahlreichen Vorteile ist ein breites Einsatzspektrum für die 3D-Dokumentation möglich. FARO (2013 b, S.1) zählt hierzu Gebäude inkl. Fassaden und Deformationen, Tatorte, Baugruben, Unfalleinzelheiten, Fabriken, Produktgeometrien und Prozessanlagen.

Mithilfe einer integrierten Kamera nimmt der Focus<sup>3D</sup> nach dem Scan automatisch Fotos der Umgebung auf. In der Weiterverarbeitungssoftware SCENE der Firma Faro werden die Fotos dann dazu verwendet, die aufgenommenen Scandaten einzufärben. Zusätzlich zu den Fotoaufnahmen wird ein automatischer Belichtungsabgleich durchgeführt (FARO 2013 a, S.46ff.). Auf Basis des oben aufgeführten horizontalen Sichtfeldes von 360° handelt es sich beim Faro Focus<sup>3D</sup> um einen Panoramascanner. Wie bereits im Abschnitt 4.1.2 beschrieben, wird der Laserstrahl durch den rotierenden Zylinderstumpf-Spiegel abgelenkt und auf die umgebenden Objekte reflektiert. Mittels der Winkelmessung und der Distanzmessung wird anschließend die dreidimensionale Punktwolke abgebildet. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Aufbau des Faro Focus<sup>3D</sup> S120.



Abbildung 27: Faro Focus 3DS  
(in Anlehnung an FARO 2013, S.1)

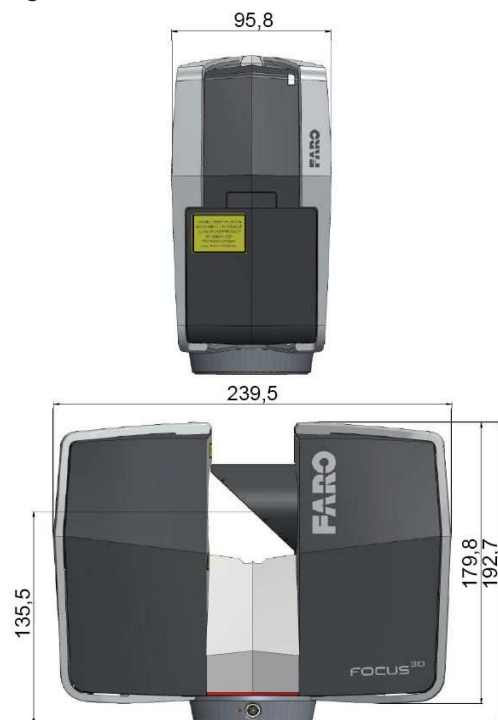


Abbildung 28: Dimensionen des Faro Focus<sup>3D</sup>  
(nach FARO 2013 a, S.121)

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Qualitätsstufen, Messraten, Rauschkompressionen, Netto-Scandauer und Augensicherheitsabstände, die beim Einsatz des Focus<sup>3D</sup> berücksichtigt werden können bzw. müssen.

Tabelle 9: Unterschiedliche Qualitätsstufen und Sicherheitsabstände (nach FARO 2013 a, S.55f.)

| Auflösung                        |     | Qualität | Messrate<br>(kpt/sec) | Rausch-<br>kompression | Netto-<br>Scanzeit<br>(voller<br>Bereich) | pt/360° | Augensicherheits-<br>abstand [m] |        |
|----------------------------------|-----|----------|-----------------------|------------------------|---|---------|----------------------------------|--------|
| Mio. Pkte<br>(voller<br>Bereich) |     |          |                       |                        |   |         | axial                            | radial |
| 710.7                            | 1/1 | 1x       | 976                   | -                      | 0:14:19                                   | 40,960  | 7.50                             | 3.60   |
| 710.7                            | 1/1 | 2x       | 488                   | -                      | 0:28:38                                   | 40,960  | 12.50                            | 6.30   |
| 710.7                            | 1/1 | 3x       | 244                   | -                      | 0:57:16                                   | 40,960  | 20.30                            | 10.90  |
| 710.7                            | 1/1 | 4x       | 122                   | -                      | 1:54:32                                   | 40,960  | 29.40                            | 16.20  |
| 177.7                            | 1/2 | 1x       | 976                   | -                      | 0:03:35                                   | 20,480  | 4.50                             | 1.80   |
| 177.7                            | 1/2 | 2x       | 488                   | -                      | 0:07:09                                   | 20,480  | 7.50                             | 3.20   |
| 177.7                            | 1/2 | 3x       | 244                   | -                      | 0:14:19                                   | 20,480  | 12.50                            | 5.50   |
| 177.7                            | 1/2 | 4x       | 122                   | -                      | 0:28:38                                   | 20,480  | 20.30                            | 8.30   |
| 177.7                            | 1/2 | 6x       | 122                   | 2x                     | 1:54:32                                   | 20,480  | 29.40                            | 16.20  |
| 44.4                             | 1/4 | 1x       | 976                   | -                      | 0:00:54                                   | 10,240  | 2.70                             | 0.30   |
| 44.4                             | 1/4 | 2x       | 488                   | -                      | 0:01:47                                   | 10,240  | 4.50                             | 1.60   |
| 44.4                             | 1/4 | 3x       | 244                   | -                      | 0:03:35                                   | 10,240  | 7.50                             | 2.80   |
| 44.4                             | 1/4 | 4x       | 122                   | -                      | 0:07:09                                   | 10,240  | 12.50                            | 4.20   |
| 44.4                             | 1/4 | 6x       | 122                   | 2x                     | 0:28:38                                   | 10,240  | 20.30                            | 8.30   |
| 44.4                             | 1/4 | 8x       | 122                   | 4x                     | 1:54:32                                   | 10,240  | 29.40                            | 16.20  |
| 28.4                             | 1/5 | 2x       | 488                   | -                      | 0:01:09                                   | 8,192   | 3.80                             | 1.30   |
| 28.4                             | 1/5 | 3x       | 244                   | -                      | 0:02:17                                   | 8,192   | 6.30                             | 2.20   |
| 28.4                             | 1/5 | 4x       | 122                   | -                      | 0:04:35                                   | 8,192   | 10.60                            | 3.30   |
| 28.4                             | 1/5 | 6x       | 122                   | 2x                     | 0:18:20                                   | 8,192   | 20.30                            | 8.30   |
| 11.1                             | 1/8 | 2x       | 488                   | -                      | 0:00:27                                   | 5,120   | 2.70                             | 0.20   |
| 11.1                             | 1/8 | 3x       | 244                   | -                      | 0:00:54                                   | 5,120   | 4.50                             | 1.40   |
| 11.1                             | 1/8 | 4x       | 122                   | -                      | 0:01:47                                   | 5,120   | 7.50                             | 2.10   |



| <i>Auflösung</i>                          |      | <i>Qualität</i> | <i>Messrate<br/>(kpt/sec)</i> | <i>Rausch-<br/>kompression</i> | <i>Netto-<br/>Scanzeit<br/>(voller<br/>Bereich)</i> | <i>pt/360°</i> | <i>Augensicherheits-<br/>abstand [m]</i> |               |
|---|------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|---|----------------|--|---------------|
| <i>Mio. Pkte<br/>(voller<br/>Bereich)</i> |      |                 |                               |                                |   |                | <i>axial</i>                             | <i>radial</i> |
| 11.1                                      | 1/8  | 6x              | 122                           | 2x                             | 0:07:09   | 5,120          | 12.50                                    | 4.20          |
| 11.1                                      | 1/8  | 8x              | 122                           | 4x                             | 0:28:38   | 5,120          | 20.30                                    | 8.30          |
| 7.1                                       | 1/10 | 3x              | 244                           | -                              | 0:00:34   | 4,096          | 3.80                                     | 0.70          |
| 7.1                                       | 1/10 | 4x              | 122                           | -                              | 0:01:09   | 4,096          | 6.30                                     | 1.70          |
| 7.1                                       | 1/10 | 6x              | 122                           | 2x                             | 0:04:35   | 4,096          | 10.60                                    | 3.30          |
| 7.1                                       | 1/10 | 8x              | 122                           | 2x                             | 0:18:20   | 4,096          | 20.30                                    | 8.30          |
| 2.8                                       | 1/16 | 3x              | 244                           | -                              | 0:00:13   | 2,560          | 2.70                                     | 0.10          |
| 2.8                                       | 1/16 | 4x              | 122                           | -                              | 0:00:27   | 2,560          | 4.50                                     | 0.90          |
| 2.8                                       | 1/16 | 6x              | 122                           | 2x                             | 0:01:47   | 2,560          | 7.50                                     | 2.10          |
| 2.8                                       | 1/16 | 8x              | 122                           | 4x                             | 0:07:09   | 2,560          | 12.50                                    | 4.20          |
| 1.8                                       | 1/20 | 4x              | 122                           | -                              | 0:00:17   | 2,048          | 3.80                                     | 0.40          |
| 1.8                                       | 1/20 | 6x              | 122                           | 2x                             | 0:01:09   | 2,048          | 6.30                                     | 1.70          |
| 1.8                                       | 1/20 | 8x              | 122                           | 4x                             | 0:04:35   | 2,048          | 10.60                                    | 3.30          |
| 0.7                                       | 1/32 | 4x              | 122                           | -                              | 0:00:07   | 1,280          | 2.70                                     | 0.10          |
| 0.7                                       | 1/32 | 6x              | 122                           | 2x                             | 0:00:27   | 1,280          | 4.50                                     | 0.90          |
| 0.7                                       | 1/32 | 8x              | 122                           | 4x                             | 0:01:47   | 1,280          | 7.50                                     | 2.10          |

Durch die Auswahl verschiedener Scanqualitäten sind theoretisch von 0.7 bis 710.7 Mio. Punkte pro Scanobjekt aufnehmbar (Wandfläche im 360° Bereich). Die rechte Tabellenseite beschreibt den axialen und radialen Augensicherheitsabstand, der jeweils von der eingestellten Auflösung und der Qualität abhängig ist (FARO 2013 a, S.12f.). Bei der angezeigten Netto-Scanzeit ist zu berücksichtigen, dass die Zeit für die Farbaufnahmen und den Belichtungsabgleich, die benötigte Vorbereitungszeit und die Nachbearbeitungszeit der Scans nicht mit inbegriffen sind. Verändert man die jeweilige Qualitätsstufe, verändert sich die Qualität des Scans. Eine einfache Qualität bedeutet in diesem Falle, dass der Laserstrahl eine Mikrosekunde auf einen Scanpunkt gerichtet ist. Bei einer vierfachen Qualität erhöht sich die Ausrichtungszeit entsprechend auf 8 Mikrosekunden pro Scanpunkt (FARO EUROPE GMBH & Co.KG 2017c). Abhängig von der Qualität und der Auflösung werden unterschiedliche Messraten angewendet. Die Messrate gibt an, wie viele Punkte pro Sekunde aufgenommen werden. Hier sind zwischen 122.000 und 976.000 Punkte pro Sekunde möglich. Eine Rauschkompression findet nur bei einer hohen Qualität (6x- bzw. 8x Qualität) statt, da hier die Laser-Ausrichtungszeit pro Punkt am größten ist und somit

auch die Anfälligkeit für Unterbrechungen steigt. Zudem beeinflusst die gewählte Auflösung (z.B.  $1/8$ ,  $1/10$ ,  $1/16$ , ...), die Qualität und der Scanbereich die Scandauer und die resultierende Dateigröße. Eine hohe Scanqualität bedeutet niedriges Rauschen in der Aufnahme, aber wiederum eine höhere Scanzeit (FARO 2013 a, S.46ff.). Des Weiteren reduziert sich bei einer hohen Scanqualität die Messrate. Die Auflösung beschreibt das horizontale und vertikale Raster des Scanbereichs. Bei einer Auflösung von  $1/2$  entspricht das Raster  $20.480 \times 8.534$  Punkten, also insgesamt 174,8 Millionen. Bei einer Scannerentfernung von 10 m zum Objekt bedeutet dies einen Punktabstand von 3,068 mm. Im Vergleich zu einer Auflösung von  $1/4$  mit einem Raster von  $10.240 \times 4.267$  Punkten (insgesamt 43,7 Millionen) entsteht ein Punktabstand von 6,163 mm. Der Sprung von  $1/2$  zu  $1/4$  Auflösung hat demnach einen doppelten Punktabstand zur Folge.

Für die Durchführung der Scanaufnahmen werden folgende Geräte und Materialien benötigt:

- Faro Focus 3D-Laserscanner
- Stativ für Laserscanner
- Referenzkugeln, montiert an Stäben mit Ausrichtunglibelle
- Stativspindeln zur vertikalen Halterung der Stäbe und Referenzkugeln
- Bodenröhrchen
- Vermessungspflöcke zur genauen Einmessung und Repositionierung
- Windmessgerät
- Bandmaß
- Kamera
- Klemmbrett
- Vermessungsprotokolle
- Markierspray



Die nachfolgende Abbildung zeigt einige der oben aufgeführten Utensilien.

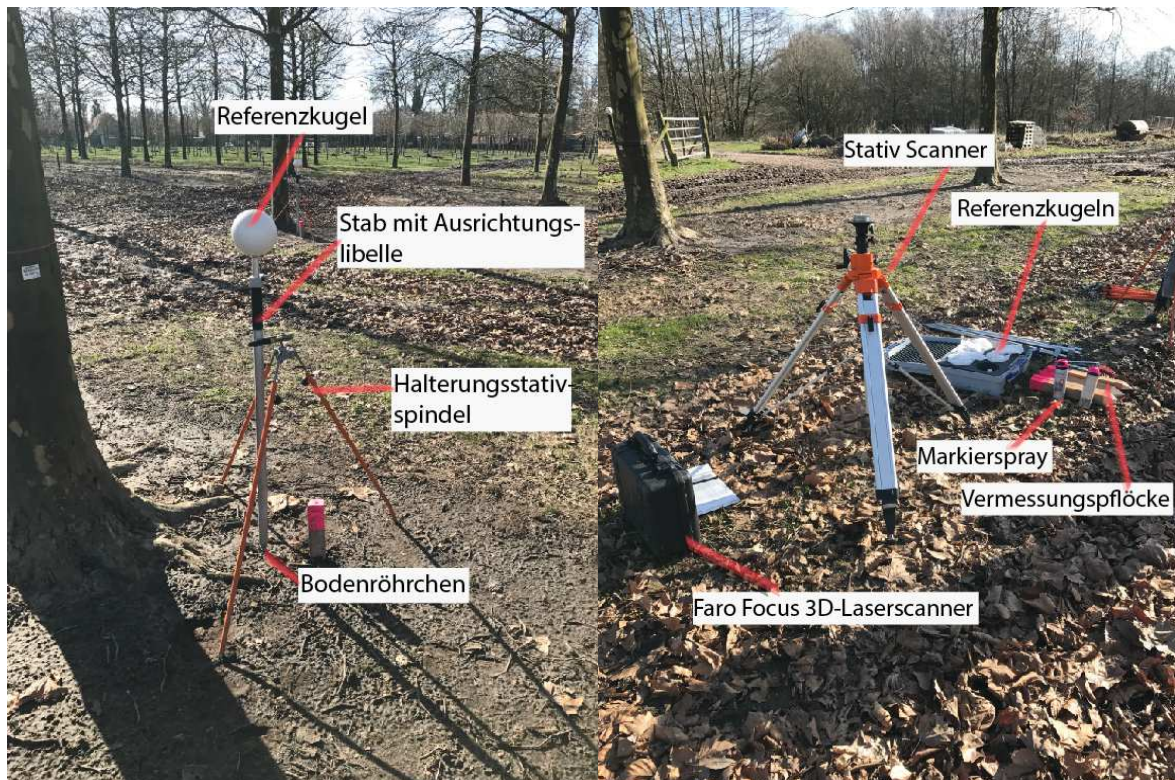


Abbildung 29 Benötigte Aufnahmematerialien

### 5.3 Untersuchungsobjekte und Gebiete

Im Gesamtumfang der Arbeit sind drei unterschiedliche Untersuchungsgebiete und drei Untersuchungsobjekte geplant.

Die Probeaufnahmen im Rahmen der Vorbereitung (Schritt 1) zur Einschätzung von unterschiedlichen Scanqualitäten werden am Straßenrand in der Marie-Curie-Straße in 49134 Wallenhorst (Untersuchungsgebiet 1) durchgeführt. Hier wird eine Eiche (Höhe ca. 12 m) als Testobjekt aufgenommen.

Die Feldarbeiten im Rahmen der Hauptdurchführung der Baumaufnahmen (Schritt 2) finden auf einem Baumschulgelände in 26160 Bad Zwischenahn (Untersuchungsgebiet 2 und 3) statt. Hier sollen zwei Platanen (*Platanus acerifolia*) unterschiedlicher Größe (Höhe ca. 20 m und 8 m) auf zwei voneinander getrennten Baumfeldern aufgenommen werden. Die Objekte werden sowohl im unbelaubten als auch im belaubten Zustand aufgenommen.

## 5.4 Erstellung eines Vermessungs-Protokolls

Damit eine detaillierte Dokumentation für die Probeaufnahmen aus Schritt 1 und die Feldaufnahmen aus Schritt 2 möglich ist, muss im Rahmen der Vorbereitung zunächst ein Vermessungs-Protokoll erstellt werden. Gegliedert wird dies in 3 Abschnitte. Der erste Abschnitt beinhaltet allgemeine Angaben über den Ort und das Datum der Aufnahmemessung. Weiterhin wird angegeben, wer die Messung durchgeführt hat. Aufgrund der in Unterkapitel 4.1.2 angegebenen, häufig auftretenden Messfehler durch atmosphärische Einflüsse sind auch Angaben über das Wetter, den Wind und die Temperatur wichtig. Bei späterer Weiterbearbeitung der Punktwolke können so etwaige Messfehler begründet werden. Die Angabe einer Objektnummer dient dem schnellen wiederfinden des Aufnahmeobjektes. Im zweiten Abschnitt des Protokolls folgen genaue Angaben über das aufzunehmende Gehölz. Hierzu gehören Angaben über den Aufnahmestandort und dessen Umgebung, die Geländebeschaffenheit, Gattung, Art und Sorte, die Baumhöhe, den Kronendurchmesser und Stammumfang, das Alter des Baumes, die Vegetationsperiode und die Oberflächenbeschaffenheit der Rinde. Der dritte Abschnitt beinhaltet wichtige Angaben zum durchgeführten Scanvorgang. Hier wird das Messgerät, die Gerätehöhe, genaue Angaben zu den Standpunkten, der eingestellten Scanparameter wie Scanqualität, Zeitmessungen während den einzelnen Scans und sonstige Angaben zum Messvorgang angegeben. Die nachfolgende Tabelle zeigt das aufgestellte Vermessungs-Protokoll.

Tabelle 10: Vorlage Vermessungs-Protokoll

### VERMESSUNGS-PROTOKOLL

#### Allgemeine Angaben:

|               |                             |
|---------------|-----------------------------|
| Ort:          | Durchführung:               |
| Datum:        |                             |
| Temperatur:   | Wetter, Regen, Wind, Licht: |
| Objektnummer: |                             |

#### Gehölzangaben:

|   |  |
|---|--|
| Standort, Geländeneigung, Umfeld, Beeinträchtigungen: |  |
| Gattung, Art, Sorte:                                  |  |
| Höhe:   |  |
| Kronen-Durchmesser:                                   |  |
| Stammumfang:  |  |
| Alter:  |  |
| Vegetationsperiode:                                   |  |
| Oberflächenbeschaffenheit/Rinde:                      |  |

#### Angaben zum Scanvorgang:

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| Messgerät:                         |  |
| Gerätehöhe:                        |  |
| Anzahl Standpunkte:                |  |
| Entfernung zum Messobjekt:         |  |
| Eingestellte Scanqualität:         |  |
| Zeit pro Einzelscan:               |  |
| Gesamtzeit für Einzelbaum:         |  |
| Messungs-Referenzierungsobjekt:    |  |
| Anzahl Referenzierungspunkte:      |  |
| Lokal/Global Referenzierungspunkt: |  |
| Eingestelltes Blickfeld:           |  |
| Mittlere Scanauflösung/Grad:       |  |
| Punktabstand:                      |  |
| Messergebnis/Punktzahl:            |  |
| Sonstige Angaben:                  |  |

Das blanko Vermessungs-Protokoll kann für jeden aufgenommenen Baum neu ausgefüllt werden. Weiterhin gehört zu jedem Protokoll eine standortbezogene Skizze, in der die Gerätestandpunkte und die Referenzstandpunkte der Kugeln eingemessen sind. Dadurch wird ein identischer Aufbau zu beiden Vegetationsperioden (belaubt und unbelaubt) gewährleistet. Darüber hinaus werden dem Vermessungs-Protokoll auf der letzten Seite Fotos angehängt, sodass sich bei eventuell auftretenden Unklarheiten jederzeit ein Situationsüberblick verschaffen lässt. In den Fotos besteht weiterhin die Möglichkeit, wichtige Objekte wie z.B. die Referenzkugeln nochmal speziell zu markieren.

## **5.5 Entwicklung eines Kriterienkataloges zur Beurteilung und Auswahl eines geeigneten Programms zur Darstellung und Weiterverarbeitung von Punktwolken**

Zur vollständigen dreidimensionalen Erfassung müssen Objekte wie Bäume von mehreren Scannerstandpunkten aus aufgenommen werden. Die daraus entstehenden Einzelscans müssen im Nachhinein in ein gemeinsames Koordinatensystem zusammengeführt werden. Dieser Prozess wird in 4.1.2 unter dem Begriff Registrierung ausführlich behandelt. Das resultierende Ergebnis kann entweder als reine Punktwolke dargestellt werden oder bis zu einem Flächenmodell für visualisierungstechnische Zwecke weiterverarbeitet werden. Aufgrund der vorhandenen Produktvielfalt wird ein Kriterienkatalog entwickelt, mit dem gängige auf dem Markt vertretene Programme und deren Funktionen zunächst aufgelistet und getestet und anschließend miteinander verglichen und bewertet werden.

Da jedes Aufnahmeobjekt individuell ist und unterschiedliche Anforderungen bzw. Kriterien an die Aufnahme und Auswertung stellen (KERSTEN ET AL. 2005, S.142), müssen diese Anforderungen zunächst speziell für Baumaufnahmen definiert werden. Aufgrund der komplexen Strukturen, die Bäume aufweisen, ist eine hohe Funktionsgenauigkeit der Programme wichtig, um den Aspekt der realitätsnahen Darstellung bestmöglich zu erfüllen. Insbesondere der Filterfunktion kommt eine hohe Gewichtung zu, um Rauschmessfehler durch Windeinflüsse so gut wie möglich zu kompensieren. Zur realitätsnahen Darstellung muss auch die Funktion der Dreiecksvermaschung gut funktionieren. Wichtig ist hier eine Exportmöglichkeit der vermaschten Punktwolke im OBJ-Format. BÖHLER ET AL. (2002, S.24) bezeichnet dieses Datenformat als weit verbreitet.

Unabhängig von der Art des aufzunehmenden Objektes ist eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche ein entscheidendes Kriterium für jedermann. Aufgenommene Farbwerte müssen ebenfalls mit übertragbar sein. Durch die Aufnahme mit dem Faro Laserscanner liegen die Roh-Scanndaten als .fls Datei vor. Folglich muss die Weiterverarbeitungssoftware eine Importmöglichkeit für .fls Dateien bieten. Alternativ dazu besteht die Möglichkeit mit Hilfe der zu Faro gehörenden Auswertungssoftware Scene weitere Export-Formate als Ausgangsbasis zu schaffen. Diese sind .e57, .wrl, .dxf, .xyz, .xyb, .igs, .pts, .ptx, .pod, .lsproj und .rcp Dateien (FARO SCENE, Version 7.0.0.39). Damit eine Produktbewertung für eine anschließende Softwareauswahl durchgeführt werden kann, werden die ausgewählten Programme in Kapitel 7. einer detaillierten Programmuntersu-

chung unterzogen. Hierfür wurde ein Kriterienkatalog aufgestellt, in dem alle softwarespezifischen Eigenschaften aufgelistet werden.

Der Katalog enthält Informationen über:

- Hersteller/Programmname

- verwendete Version

Hier wird vermerkt, welche Version vorliegt und ob Lizenz- und somit Funktionseinschränkungen in Form von Test- oder Studentenversionen vorliegen.

- System- oder Drittanbieter

Als Systemanbieter werden Programme bezeichnet, die direkt von Scannerherstellern mit angeboten werden. Darüber hinaus gibt es zahlreiche Softwarepakete von unabhängigen Drittanbietern.

- Allgemeine Herstellerbeschreibung

Hier wird stichpunktartig aufgeführt, wie der Hersteller das eigene Produkt beschreibt

- Programmfunktionen und Bedienoberfläche

Durch eine übersichtliche Darstellung soll auf einen Blick gezeigt werden, über welche Funktionen das Programm verfügt und über wie viele Ebenen die Einzelfunktionen erreichbar sind. Hieraus lassen sich Ableitungen über die Verschachtelung und die Benutzerfreundlichkeit des Programmes schließen.

- Importformate

Auflistung aller unterstützenden (kompatiblen) Importformate.

- Exportformate

Auflistung aller möglichen Exportformate.

- Beschreibung Importvorgang

An dieser Stelle wird genau beschrieben, welche Schritte notwendig sind, um eine Datei zu importieren und ob sich einzelne Parameter einstellen lassen. Die importierte Punktwolke wird bildlich dargestellt.





|  |                            |
|--|----------------------------|
| Beschreibung Importvorgang             | Unterstützung durch Bilder |
| Bewertung Benutzerfreundlichkeit       | Positiv:<br><br>Negativ:   |
| Schwierigkeiten während der Benutzung: |                            |

Bei der Beschreibung der Programmfunktionen innerhalb der Bedienoberfläche zeigt die erste Ebene all die Funktionen, die auf den ersten Blick nach Programmstart sichtbar sind. Die weiteren Ebenen werden erst nach und nach über Pulldown-Menüs sichtbar. Zusätzlich soll durch ein Sternchen „\*“ hinter der Funktion gezeigt werden, dass diese innerhalb der vorliegenden Lizenz nicht zur Verfügung steht, was eine erheblich reduzierte Programmnutzung bedeuten kann. Jede durchgeführte Programmuntersuchung liefert softwarespezifische Informationen in einem Schnellüberblick und dient als Fundament zur Entscheidungsfindung und Programmbeurteilung.



Im nächsten Schritt ist es das Ziel, diese gewonnenen Informationen miteinander zu vergleichen. Dafür wurde eine weitere Tabelle entwickelt, die Informationen aus den Programmuntersuchungen bündelt und vergleichbar darstellt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Tabelle als Blankoausführung.

| Programmname,<br>Hersteller: | Version &<br>Datum: | System-/Drittanbieter | Benutzerfreundlichkeit | Benutzungseinschränkungen | Funktion      |                    |                |           | Importformate       |      |      |      |      |      |      | Exportformate |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|---------------|--------------------|----------------|-----------|---------------------|------|------|------|------|------|------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                              |                     |                       |                        |                           | Registrierung | Geo-Referenzierung | Visualisierung | Filterung | Dreiecksvermaschung | .asc | .csv | .txt | .xyz | .yxz | .xyb | .pts          | .ptx | .ptz | .asc | .csv | .txt | .nsd | .pts | .ptx |
|                              |                     |                       |                        |                           |               |                    |                |           |                     |      |      |      |      |      |      |               |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                              |                     |                       |                        |                           |               |                    |                |           |                     |      |      |      |      |      |      |               |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                              |                     |                       |                        |                           |               |                    |                |           |                     |      |      |      |      |      |      |               |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                              |                     |                       |                        |                           |               |                    |                |           |                     |      |      |      |      |      |      |               |      |      |      |      |      |      |      |      |

Tabelle 12: Vergleichstabelle zur Beurteilung und Auswahl geeigneter Programme

Informationen wie Hersteller/Programmname und System-/Drittanbieter werden zum direkten Vergleich aus dem Kriterienkatalog übernommen.

Folgende Informationen werden ergänzt:

- Benutzerfreundlichkeit

Hier soll durch ein Ampelsystem der gewonnene Eindruck aus der detaillierten Programmuntersuchung (Bedienoberfläche, Anzahl der Programmebenen und Abwägung der positiven und negativen Eindrücke) gebündelt werden und mit Rot für schlechte, Gelb für mittlere und Grün für hohe Benutzerfreundlichkeit signalisiert werden.

- Benutzungseinschränkungen

Hier wird vermerkt, ob innerhalb der Programmnutzung gravierende Benutzungseinschränkungen vorliegen. Auch dies kann im unmittelbaren Vergleich zu anderen Programmen ein schnelles Ausschlusskriterium des vorliegenden Programmes sein. Gebündelt aus den Informationen aus der detaillierten Programmuntersuchung (auftretende Schwierigkeiten) wird auch die Benutzungseinschränkung im Ampelsystem bewertet, wobei Rot für extreme, gelb für nicht unerheblich und grün für zu vernachlässigende Benutzungseinschränkungen steht.

- Funktionen

In 4.1.3 wurden bereits die erforderlichen Weiterverarbeitungsschritte von der Registrierung bis zur Erstellung eines Flächenmodells für die Visualisierung aufgeführt. Durch das Setzen

eines Hakens oder eines Kreuzes soll ein schneller Überblick über die jeweilig verfügbaren Programmfunktionen gewährleistet werden.

### - Importformate

Hier sollen, wie im Kriterienkatalog, alle möglichen programmindividuellen Importformate aufgeführt werden. Durch Haken oder Kreuze erhält man später einen Überblick, welche Programme die gleichen Importformate vertreten und welche Importformate die gängigsten sind.

### - Exportformate

Ergänzend zu den Importformaten werden auch alle möglichen Exportformate nochmals aufgeführt. Hieraus lässt sich weiterhin schnell erkennen, welche der aufgeführten Programme untereinander kompatibel sind.

Durch die Gegenüberstellung und den unmittelbaren Softwarevergleich ist es anschließend möglich, die unter Berücksichtigung der definierten Anforderungen optimalen Programme für die Weiterbearbeitung von Baumpunktwolken herauszufiltern.

## 6 Voruntersuchung I: Probeaufnahmen und Qualitätsdefinition

In Kapitel 6 wird die Durchführung der Probeaufnahmen beschrieben und die Ergebnisse vorgestellt und unter Berücksichtigung der Faktoren der menschlichen Wahrnehmung miteinander verglichen. Auf dieser Basis erfolgt eine Festlegung von Qualitätsmerkmalen und Scaneinstellungen für die Durchführung der Hauptaufnahmen (Schritt 2).

### 6.1 Probeaufnahmen und Ergebnisse

In der allgemeinen Vorgehensweise in Unterkapitel 5.1 wurde erläutert, dass es keine Richtlinien oder geprüfte, optimale Verfahrensanweisungen zur Einzelbaumaufnahme mittels terrestrischem Laserscanning gibt. Deswegen müssen zunächst Probeaufnahmen durchgeführt werden, um einen ersten Eindruck über erzielbare Qualitäten und damit verbundene Zeitaufwendungen zu erhalten. Dafür wurde eine Stiel-Eiche (*Quercus robur*) in der Marie-Curie-Straße in Wallenhorst (Osnabrück) aufgenommen. Die nachfolgende Abbildung zeigt den genauen Standort.

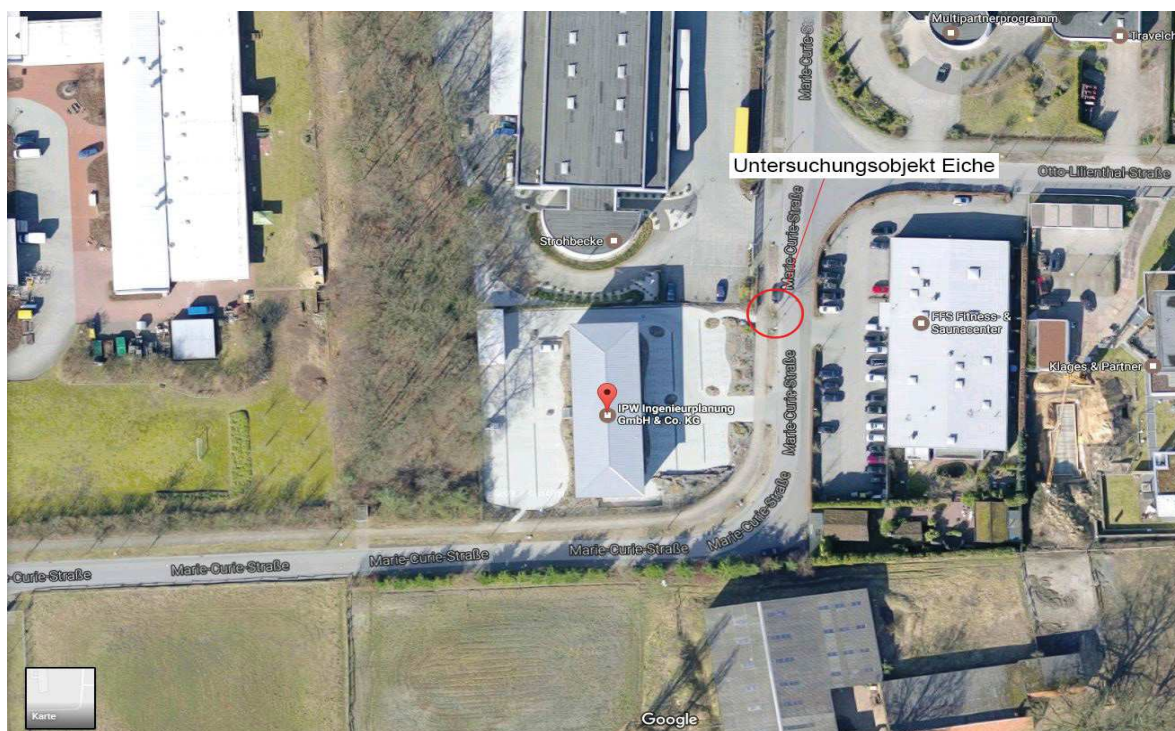


Abbildung 30: Testgebiet 1 (Kartenauszug aus AEROWEST, KARTENDATEN 2017, GeoBASIS-DE/BKG 2017, GOOGLE 2009, 52°21'10.6"N 7°59'47.4"E).



Abbildung 31: Testobjekt Eiche (*Quercus robur*)

Die Eiche steht an einer Einfahrt am Straßenbereich auf einem umläufig ebenen Gelände und weist folgende Eigenschaften auf:

- Höhe: ca. 12 m
- Kronen-Durchmesser: ca. 7,50m
- Stammumfang: 0,95 m
- Alter: 25-30 Jahre
- Oberflächenbeschaffenheit/Rinde: rissig, rau.

Die ersten Aufnahmen erfolgten am 16.12.2016 und 26.01.2017 im unbelaubten Zustand. Wie in 5.1 erläutert, werden im ersten Versuchsdurchlauf zwei Scanqualitäten (Auflösung =  $\frac{1}{4}$ , Qualität = 3x und Auflösung =  $\frac{1}{2}$ , Qualität =

4x) getestet. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Weiterverarbeitungszeit der aufgenommenen Punktwolke bei einem durchschnittlichen Aufwandsverhältnis von 1:10 (vgl. Unterkapitel 4.1.3) ergeben sich die in Tabelle 13 aufgeführten Gesamtbearbeitungszeiten.

Tabelle 13: Übersicht Scaneinstellungen und die damit verbundenen Zeitaufwendungen (FARO 2013 a, S.55f.)

| Scaneinstellungen          | Nettoscanzeit/ Standpunkt | Anzahl der Standpunkte | Gesamtscanzeit | Zeit Weiterverarbeitung | Gesamtbearbeitungszeit |
|----------------------------|---------------------------|------------------------|----------------|-------------------------|------------------------|
| 1/4 Auflösung, 3x Qualität | 00:03:35                  | 4                      | 00:14:20       | 02:23:20                | 02:37:40               |
| 1/2 Auflösung, 4x Qualität | 00:28:38                  | 4                      | 01:54:32       | 19:05:20                | 20:59:52               |

Unter in Bezugnahme der Weiterverarbeitungszeit und der hieraus resultierenden Gesamtbearbeitungszeit von ca. 21 Stunden wird die in 5.1 als ökonomische Obergrenze eingestufte Nettoscanzeit für die hohe Scaneinstellung von ca. 28 min bestätigt. Somit lässt sich die maximale Scaneinstellung auf Auflösung =  $\frac{1}{2}$ , Qualität = 4x festlegen. Noch höhere Einstellungen sind auszuschließen, da hier die Nettoscanzeiten pro Standpunkt bereits bei ca. 1 Stunde (Auflösung =  $\frac{1}{1}$ , Qualität = 3x) bzw. 2 Stunden (Auflösung =  $\frac{1}{1}$ , Qualität = 4x) liegen (FARO 2013 a, S.55f.). Die niedrige Scaneinstellung (Auflösung =  $\frac{1}{4}$ , Qualität = 3x) entspricht der Mindesteinstellung, welche für eine Kugelerkennung notwendig ist (vgl. Unterkapitel 5.1).

Aufgrund des Kronendurchmessers von 7,60 m werden für jede Baumaufnahme vier Scannerstandpunkte gewählt, damit eine gesamtflächige Aufnahme mit ausreichender Überlappung gewährleistet wird. Der Abstand zum Baum sollte so gering wie möglich gewählt werden, um einen möglichst kleinen Punktabstand am aufzunehmenden Objekt zu erhalten (vgl. Unterkapitel 5.2). Weiterhin muss der Scanner so platziert werden, dass vom Standpunkt aus der größtmögliche horizontale Teil des Aufnahmeobjektes erfasst wird und dass die vertikale Erfassung bis zur Kronenoberkante reicht. Hierbei ist der maximale vertikale Aufnahmewinkel des Faro-Laserscanners von 300° zu berücksichtigen (vgl. Unterkapitel 5.2).

Neben der Scannerstandpunktwahl ist die korrekte Platzierung der Referenzkugeln (145 mm Durchmesser) als Passpunkte wichtig. Wegen der abnehmenden Genauigkeit der Kugelerkennung bei zunehmender Entfernung zwischen Kugel und Scanner sollte bei einer 145 mm großen Kugel eine Entfernung von 18 m nicht überschritten werden. Zusätzlich sollten die Referenzkugeln von den jeweiligen Standorten komplett sichtbar sein (FARO 2013 a, S.58). Darüber hinaus ist ein Mindestabstand von 1 m zwischen zwei Kugeln einzuhalten (FARO 2017). Damit eine erfolgreiche Registrierung gewährleistet werden kann, muss die Anordnung der Kugeln so erfolgen, dass von jedem Scannerstandpunkt aus immer mindestens 2 Kugeln sichtbar sind.

Zur genauen Dokumentation der Aufnahme wurde das in 5.4 aufgestellte Vermessungsprotokoll angewendet.



Tabelle 14: Vermessungs-Protokoll Aufnahme Eiche, niedrige Scaneinstellung

### VERMESSUNGS-PROTOKOLL (16.12.2016, NIEDRIGE SCANEINSTELLUNG)

#### Allgemeine Angaben:

|                   |   |
|-------------------|---|
| Ort: Osnabrück    | Durchführung: Langemeyer, Jost, Thönnissen  |
| Datum: 16.12.2016 |   |
| Temperatur: 7°    | Wetter, Regen, Wind, Licht:<br>durchwachsen, bedeckter Himmel, leichter Wind: 2,7-3,8 m/s |
| Objektnummer: 01  |   |

#### Gehölzangaben:

|   |   |
|---|---|
| Standort, Geländeneigung, Umfeld, Beeinträchtigung: | ebenes Gelände, Einfahrt am Straßenrand |
| Gattung, Art, Sorte:                                | Quercus robur                           |
| Höhe:   | ca. 12 m                                |
| Kronen-Durchmesser:                                 | 7,60 m                                  |
| Stammumfang:  | 95 cm                                   |
| Alter:  | 25-30 Jahre                             |
| Vegetationsperiode:                                 | blattlos, Ruhezeit                      |
| Oberflächenbeschaffenheit/Rinde:                    | rissig, rau                             |

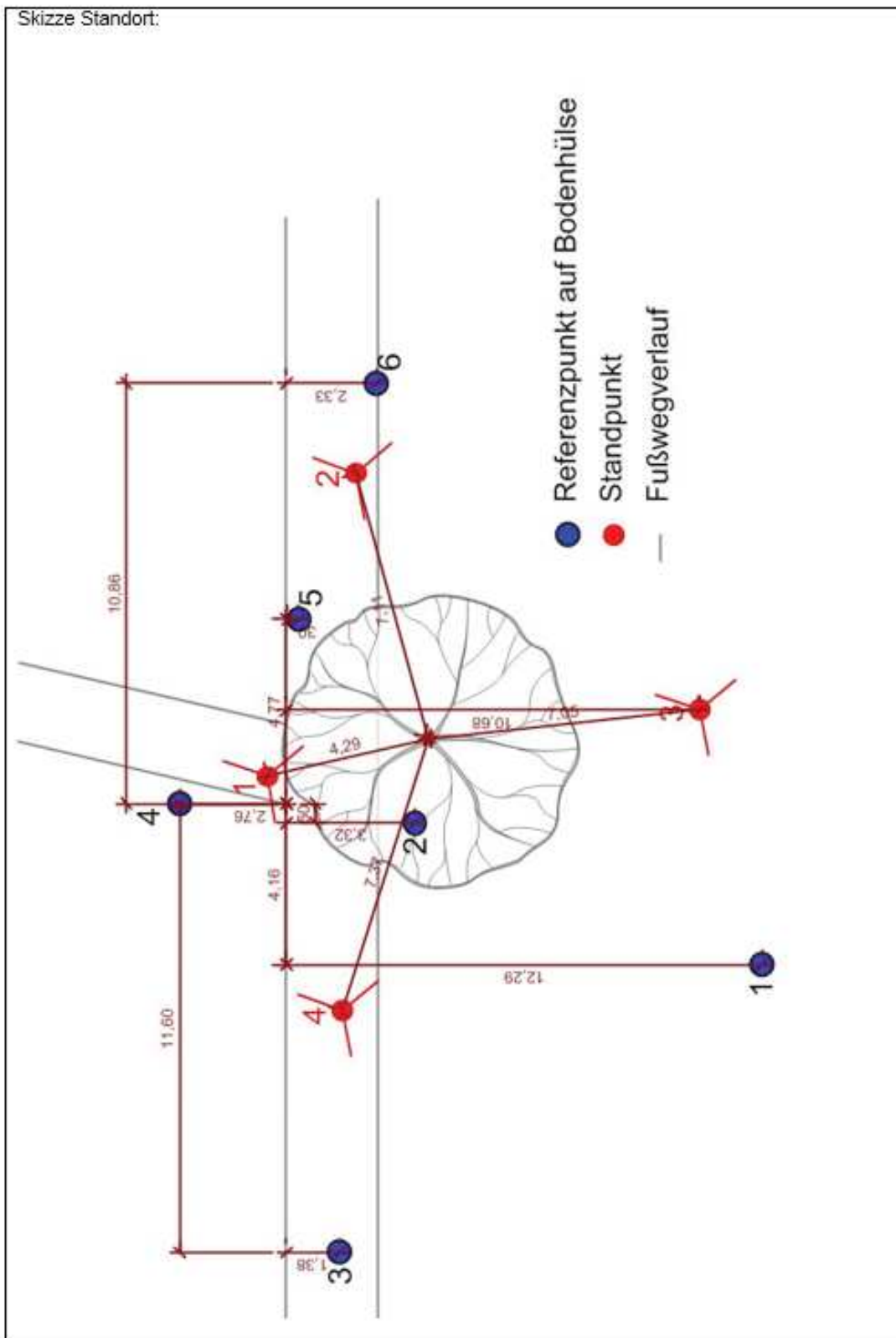
#### Angaben zum Scanvorgang:

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| Messgerät:                         | FARO Focus 3D S120                                   |
| Gerätehöhe:                        | 1,70 m   |
| Anzahl Standpunkte:                | 4 Stk.   |
| Entfernung zum Messobjekt:         | 3,90 m / 7,05 m / 6,90 m / 7,3 m                     |
| Eingestellte Scanqualität:         | Auflösung= 1/4 , Qualität= 3x, Messrate= 244 kpt/sec |
| Zeit pro Einzelscan:               | 8 min / 8 min / 8 min / 8 min                        |
| Gesamtzeit für Einzelbaum:         | 40 min   |
| Messungs- Referenzierungsobjekt:   | Kugel  |
| Anzahl Referenzierungspunkte:      | 6 Stk.   |
| Lokal/Global Referenzierungspunkt: | Lokal  |
| Eingestelltes Blickfeld:           | 360°   |
| Niedrige Scanauflösung/Grad:       | 10.240 x 4.267 = 43,7 Mio. Punkte                    |
| Punktabstand:                      | In 10 m Entfernung = 6,163 mm                        |
| Messergebnis/Punktzahl:            | 2.925.801  |
| Sonstige Angaben:                  | -  |



## VERMESSUNGS-PROTOKOLL (16.12.2016, NIEDRIGE SCANEINSTELLUNG)

Skizze Standort:



## VERMESSUNGS-PROTOKOLL (16.12.2016, NIEDRIGE SCANEINSTELLUNG)

Fotos:



Abbildung 1: Referenzpunkte 2 und 5



Abbildung 2: Originalfoto Eiche



Abbildung 3: Standpunkt 4

Seite 3 von 4

VERMESSUNGS-PROTOKOLL (16.12.2016, NIEDRIGE SCANEINSTELLUNG)



Abbildung 4: Referenzpunkte 2 und 4



Abbildung 5: Referenzpunkt 3



Abbildung 6: Referenzpunkte 5 und 6

Die zweite Aufnahme (hohe Scaneinstellung) erfolgte am 26.01.2017 im unbelaubten Zustand. Alle weiteren Einzelheiten sowie Bilder und Standortskizze sind den Anlagen (1.2 Vermessungs-Protokoll vom 26.01.2017, Aufnahme Eiche, unbelaubt, in hoher Scaneinstellung, S. 7ff.) zu entnehmen.

Die nachfolgende Tabelle 15 zeigt den aufgenommenen Probebaum mit zugehöriger Qualität, Anzahl der Standpunkte und Gesamtscandauer inkl. Berücksichtigung der Umrüstzeiten beim Standortwechsel.

Tabelle 15: *Schnellübersicht Probeaufnahmen*

| Nr. | Datum      | Baum  | Veg.-Per. | Aufnahme-qualität   | Anzahl Standpkt. | Gesamt-Scandauer |
|-----|------------|---|-----------|---------------------|------------------|------------------|
| 1   | 16.12.2016 | Eiche, Straßenraum Marie-Curie-Str. Wallenhorst (Probeaufnahme) | unbelaubt | 1/4 Aufl., 3x Qual. | 4                | 40 min           |
| 1   | 26.01.2017 | Eiche, Straßenraum Marie-Curie-Str. Wallenhorst (Probeaufnahme) | unbelaubt | 1/2 Aufl., 4x Qual. | 4                | 2 h              |

Im Unterkapitel 4.1.3 wurde unter Standpunktplanung und Einsatz von Referenzpunkten bereits grundlegend erklärt, dass mithilfe von Referenzkugeln mehrere Punktwolken, die aus unterschiedlichen Scannerstandpunkten entstanden sind, zusammengeführt werden können. Dieser Prozess der Registrierung über Zielmarken erfolgt bei dem eingesetzten Laserscanner Faro Focus 3D S120 automatisch. Nach dem Auslesen und der automatischen Registrierung erhält man eine .fls Datei für jeden Scannerstandpunkt als Ausgangsbasis. Die jeweiligen Einzelscans befinden sich durch die abgeschlossene Registrierung im selben Koordinatensystem. Eine Beschreibung des Importvorgangs befindet sich in der detaillierten Programmuntersuchung zu Faro Scene im Anhang (2.1 Faro Scene, S. 14ff.). Nachdem die Einzelscans eingelesen wurden kann die Zuordnung der Referenzpunkte überprüft und ggf. angepasst werden. Wie die folgende Abbildung zeigt, nimmt der Scanner das unmittelbare Gesamtumfeld als Punktwolke auf.



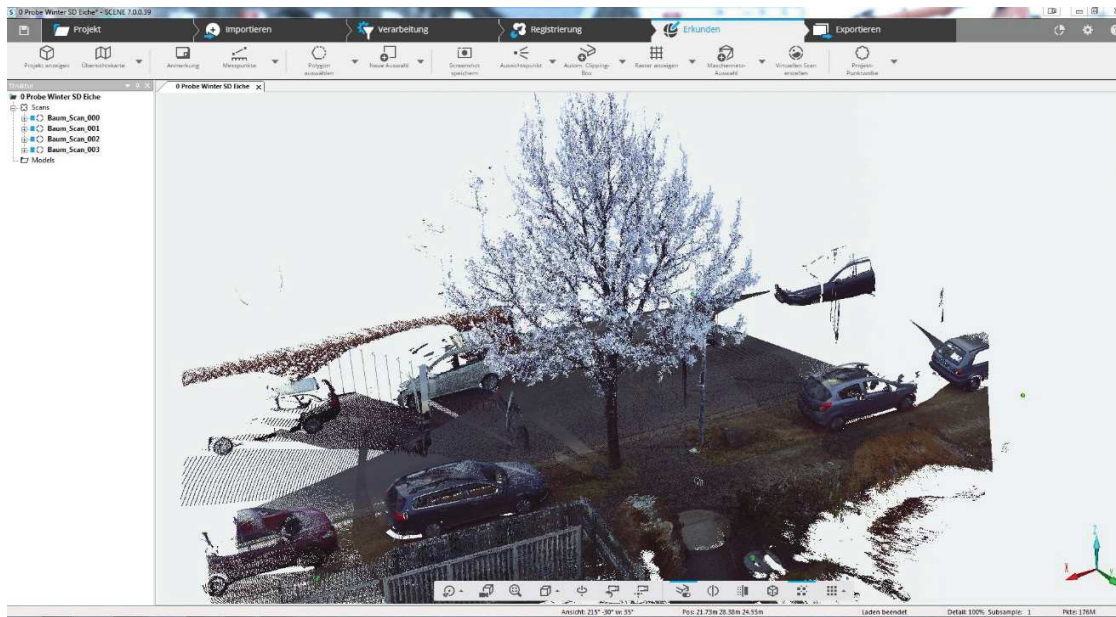


Abbildung 32: Darstellung Scanaufnahme ohne Objektzuschnitt in FARO SCENE Version 7.0.0.37.

Zoomt man an die Aufnahme näher heran, sind auch die Referenzkugeln (grün) und die Scannerstandpunkte (weißer Messschatten) zu sehen.

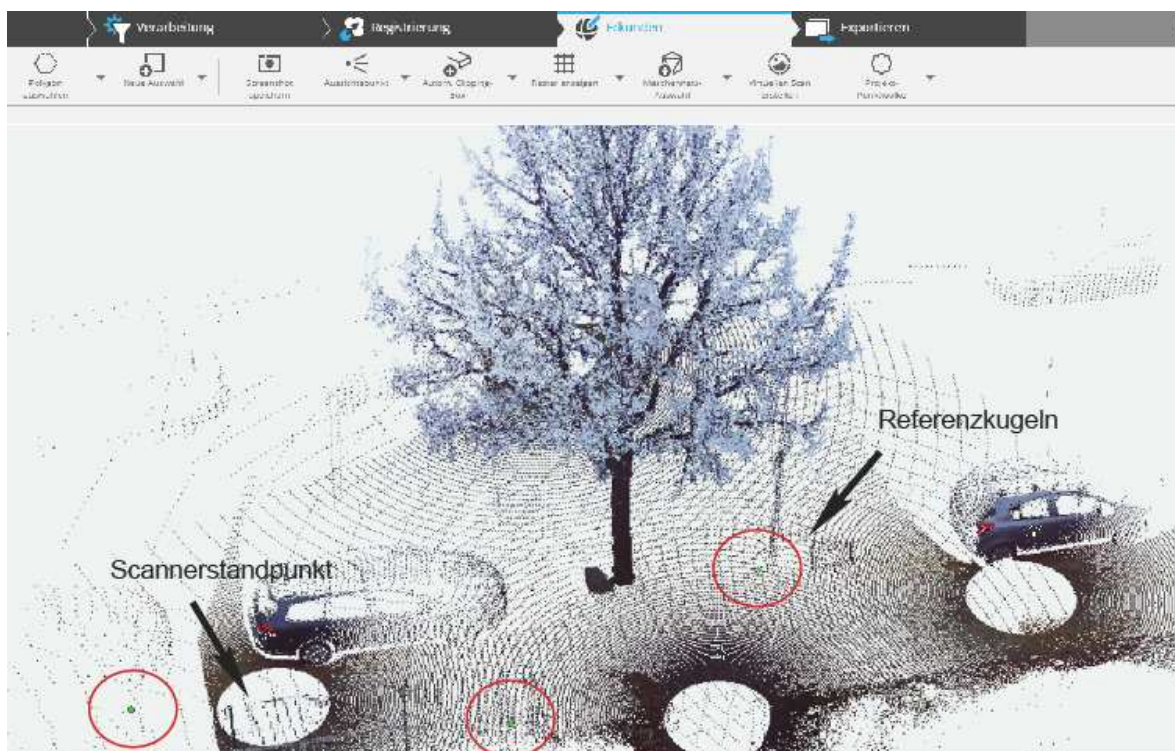


Abbildung 33: Anzeige Referenzkugeln und Scannerstandpunkte in FARO SCENE Version 7.0.0.37

Zur weiteren Bearbeitung muss das Scanergebnis auf das wesentliche, den Baum als Fokuselement, reduziert werden. Dafür wird die überflüssige Umgebung herausgeschnitten (FARO SCENE Version 7.0.0.37). Hierzu wechselt man in Faro Scene in den Arbeitsbereich „Erkunden“. Von der vorgegebenen isometrischen Perspektive wechselt man anschließend in die Ansicht von oben, um



den Scanbereich am einfachsten abzugrenzen. Mittels der Polygonauswahl (vgl. Abbildung 34) wird der zu erhaltende Bereich umfahren.

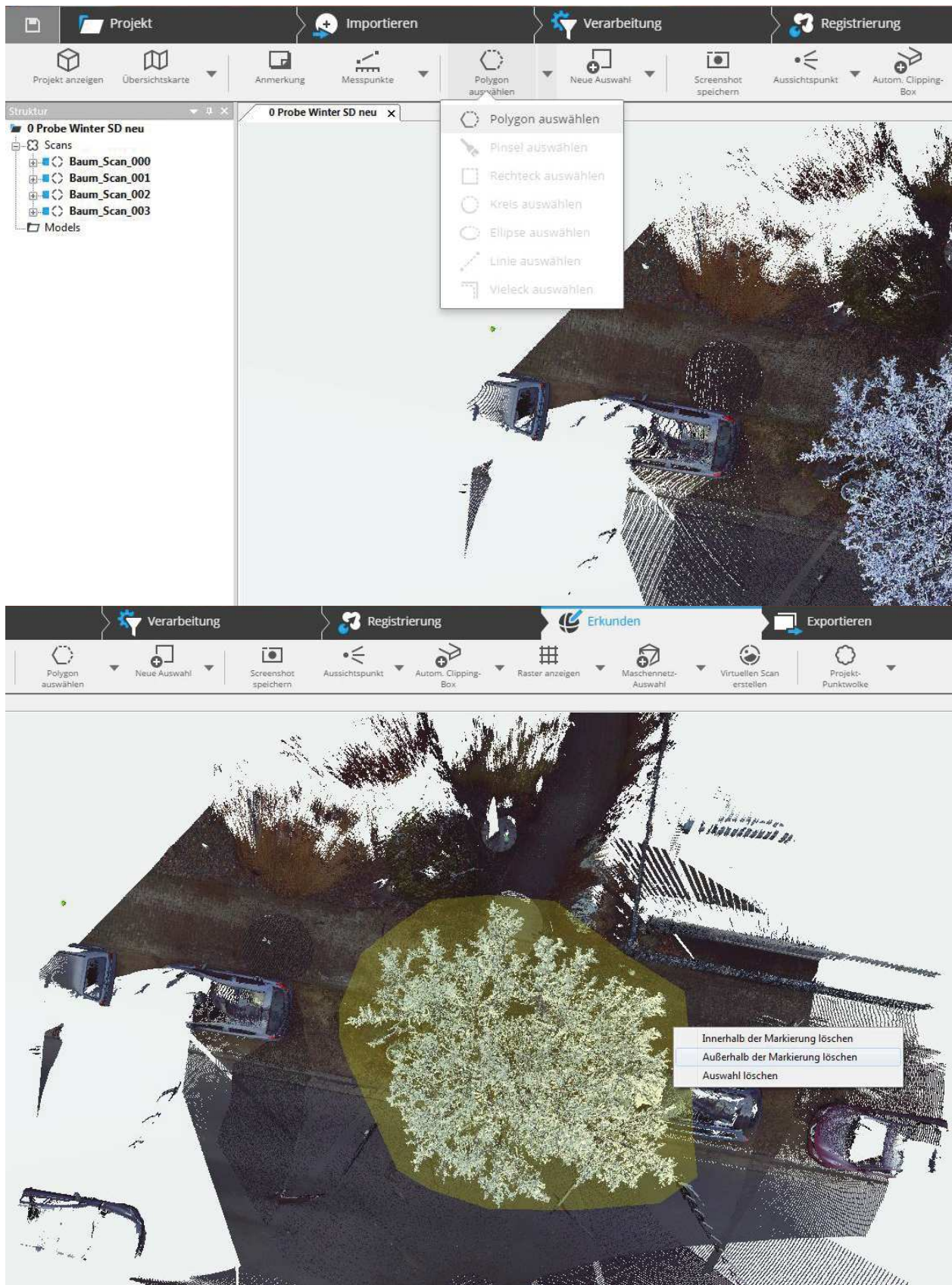
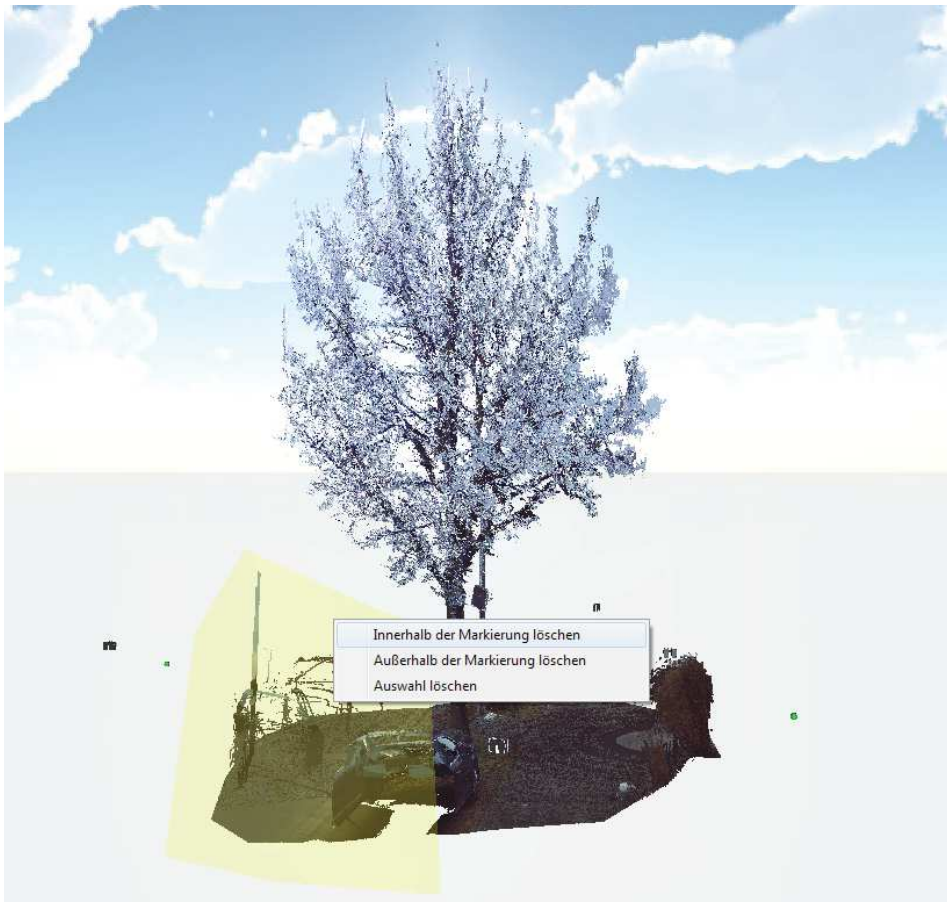


Abbildung 34 Anwendung der Polygonauswahl in FARO SCENE Version 7.0.0.37



Über einen Rechtsklick auf der Maus in das markierte Feld hat man die Option, das Aufnahmefeld außerhalb der zuvor getroffenen Markierung zu löschen. Nachdem dies vollzogen ist, wird das Ansichtsfenster von „oben“ nach „rechts“ gewechselt. Hier werden die noch existierenden überflüssigen Punkte markiert und über die Funktion „Innerhalb der Markierung löschen“ ebenfalls entfernt (vgl. *Abbildung 35*).



*Abbildung 35: Entfernung weiterer Punkte aus der von rechts gewählten Ansicht in FARO SCENE Version 7.0.0.37*

Dieser Vorgang wird ebenfalls von der Vorderansicht wiederholt, bis alle unerwünschten Punkte entfernt wurden. Als fertiges Ergebnis liegt nun die freigeschnittene Punktwolke vor, die in der nachfolgenden Abbildung dargestellt wird.



Abbildung 36: Freigeschnittene Baumpunktwolke in FARO SCENE Version 7.0.0.37

Die nachfolgenden Bilder zeigen die beiden Aufnahmen der Eiche im unbelaubten Zustand, un-  
bearbeitet in niedriger und hoher Auflösung.



Abbildung 37: Aufnahmeergebnis Eiche, Aufnahmeeinstellung niedrig, Winter (links), Aufnahmeeinstellung hoch, Winter (Mitte) (dargestellt in FARO SCENE, Version 7.0.0.37) und original Foto (rechts).

Tabelle 16: Ergebnisse aus der Probeaufnahme, Winter

| Baum  | Aufnahmeeinstellung         | Zustand   | Dateiformat | Gesamt-Punktzahl | Scanzeit | Dateigröße |
|-------|-----------------------------|-----------|-------------|------------------|----------|------------|
| Eiche | ¼ Auflösung,<br>3x Qualität | unbelaubt | .fls        | 2.925.801        | 40 min   | 645 MB     |
| Eiche | ½ Auflösung,<br>4x Qualität | unbelaubt | .fls        | 33.017.066       | 2 h      | 1,69 GB    |

Vergleicht man die Bilder fällt auf den ersten Blick auf, dass der linke Baum mit niedriger Scaneinstellung aufgrund der geringeren Auflösung und Qualität deutlich weniger Punkte aufweist (vgl. *Abbildung 37*). Dies belegt *Tabelle 16* aus der ersichtlich wird, dass die Gesamtpunktzahl der niedrigen Scaneinstellung nur rund 1/10 der Gesamtpunkte der hohen Scaneinstellung aufweist. Dennoch sind die Baum-, Kronen-, bzw. Aststrukturen hier zunächst deutlicher zu erkennen. Grund hierfür ist, dass das Messrauschen aufgrund der Kombination äußerer Windeinflüsse (atmosphärische Einflüsse) und der längeren Scanzeit durch die höhere Auflösung stärker sichtbar ist. Dies ist auf die längere Ausrichtungszeit des Lasers auf einen Punkt zurückzuführen. Wie den Vermessungs-Protokollen zu entnehmen ist, lag die maximale Windgeschwindigkeit bei der niedrigeren Scaneinstellung bei 3,8 m/s und bei der hohen Scaneinstellung bei 4,5 m/s. Hier sind also auf Basis der Windunterschiede nur geringe Differenzen zwischen den Aufnahmen zu verzeichnen.

Nach ersten Erkenntnissen ist demzufolge die niedrige Scaneinstellung für den oben aufgenommenen Baum mit dessen Größen- und Kronenausdehnung sowie Astverzweigung ausreichend. Mit dem Ziel der Erreichung einer hohen Detailschärfe ist bei Bäumen, die größer und dichter verzweigt sind als der Probestaum eine höhere Scaneinstellung nicht außer Acht zu lassen. Insbesondere kleinere Äste mit einem theoretischen Durchmesser bis 1,2 cm werden durch den größeren Punkt- abstand (ca. 6 mm) bei der geringen Scaneinstellung schnell übermessen bzw. nicht richtig aufgenommen. Dies belegen die beiden nachfolgenden Abbildungen.





Abbildung 38: Darstellung kleiner Äste bei geringer Scaneinstellung (dargestellt in FARO SCENE, Version 7.0.0.37)

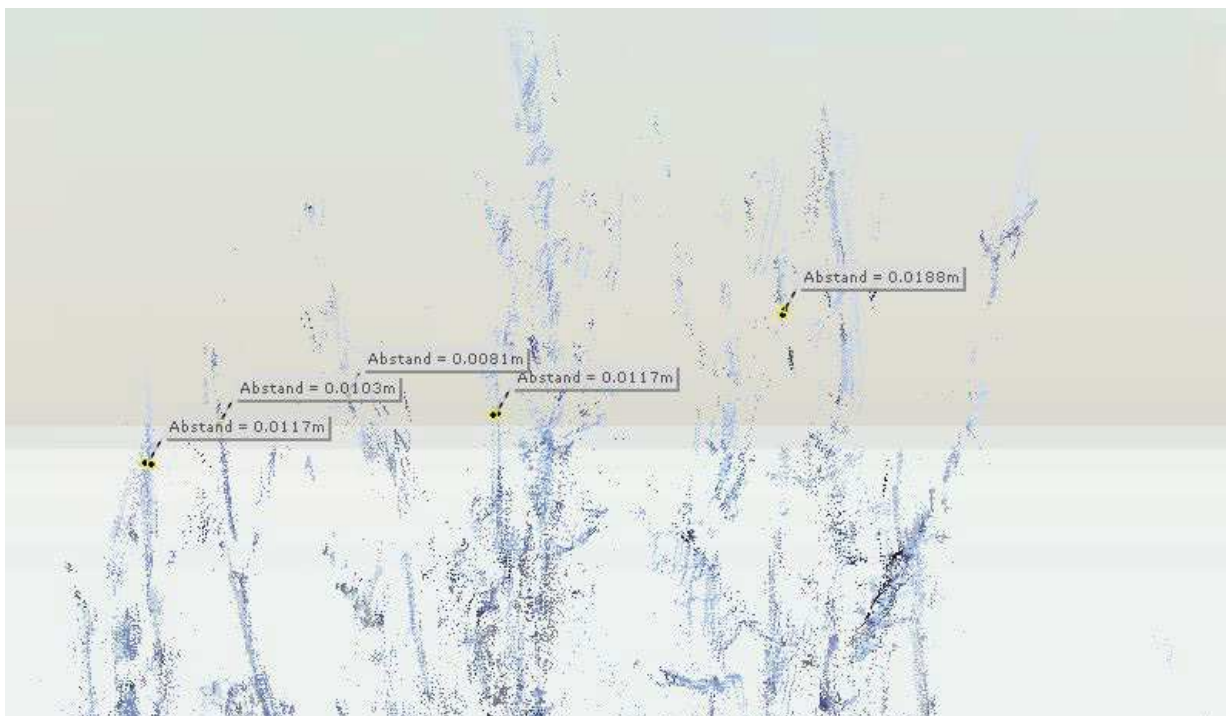


Abbildung 39: Darstellung kleiner Äste bei hoher Scaneinstellung (dargestellt in FARO SCENE, Version 7.0.0.37)

Wie man auf *Abbildung 38* und *Abbildung 39* erkennen kann, werden bei der geringen Scaneinstellung dünnere Äste zwar dargestellt, jedoch nur linienhaft und nicht im vollen Umfang. Dies hat zur Folge, dass der Durchmesser erst bei dickeren Ästen ab 2,5 cm bestimmt werden kann. Bei der hohen Scaneinstellung sind wiederum dünne Äste deutlicher ausgeprägt und können ab 0,8 cm erfasst werden. Die tatsächlichen Werte weichen von den oben aufgeführten theoretischen Werten etwas ab. Die Abweichung ist abhängig von der Lage des Astes auf dem Scanraster bzw. der Position des ersten Auftreffens des Messstrahls auf den Ast.

Darüber hinaus ist im belaubten Zustand eine höhere Scaneinstellung zu erwarten, damit vielseitig überlagernde Blattstrukturen korrekt erfasst werden können.

### **6.2 Untersuchung der Ergebnisse in Bezug auf die Faktoren menschlicher Wahrnehmung**

In Kapitel 4.2.2 wurde ausführlich auf die Aspekte der menschlichen Wahrnehmung eingegangen. Demnach spielt insbesondere die Genauigkeit und somit die Widerspiegelung des Echtheitsgrades eine entscheidende Rolle. Dieser wird vor allem durch optische Klarheit erreicht. Verzweigungsstrukturen und Habitusformen sowie kleine Details wie Astschnitte im Stammbereich müssen deutlich wiedergespiegelt sein. Zum Schluss darf die Übernahme von korrekt dargestellten Farbwerten nicht fehlen.

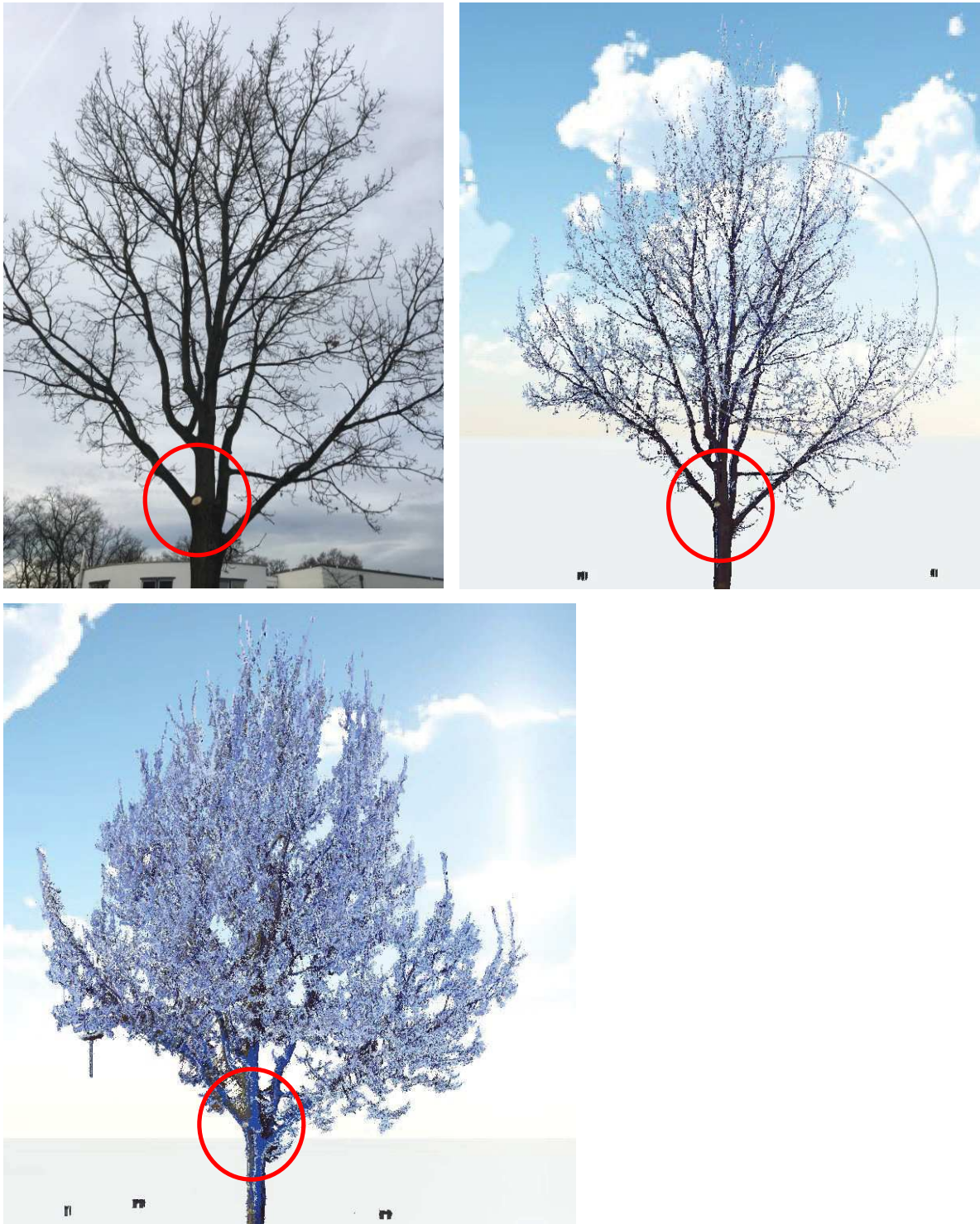


Abbildung 40: *Fotoaufnahme Eiche (links), Scanaufnahme niedrige Einstellung Eiche (rechts) und Scanaufnahme hohe Einstellung Eiche (unten)*(dargestellt in FARO SCENE, Version 7.0.0.37)





Abbildung 41: Nachbildung Linienmodell zur Astbildung

Vergleicht man die Fotoaufnahme (links, Abbildung 40) mit der Scanaufnahme (rechts) erkennt man eine optische Klarheit von Details. Der Kronenansatz z.B. wird im Detail eins zu eins mit seinen dickeren Astanläufen wiedergespiegelt. Auch der Astschnitt im Stammbereich ist klar zu erkennen (Kreisausschnitt Abb. Abbildung 40). Vergleicht man die Habitusformen, kommt der Habitus der höheren Scanaufnahme dem Original näher. Besonders im oberen Bereich läuft die Krone bei der niedrigen Einstellung spitzer zu als im Original (vgl. Habitusumriss *Abbildung 42*).

Nachteilig bei der niedrigen Einstellung ist, dass nicht alle Äste bis ins Spitzenende voll abgebildet werden. Um dies deutlich zu machen, wurde der Astverlauf des Originals als Linienmodell nachgebildet (vgl. *Abbildung 41*). Legt man dieses Modell auf die gleich skalierte Größe und gedrehte Ansicht der Aufnahmen wird das Problem schnell ersichtlich (vgl. *Abbildung 42*). Wie oben erwähnt werden die Äste im Spitzen- und Randbereich aufgrund der geringen Aststärke bei der niedrigen Einstellung nicht voll ausgebildet. Lediglich vereinzelte Punkte werden hier im Scan noch registriert. Bei der hohen Scaneinstellung wiederum wird das Kronenvolumen im Spitzen- und Randbereich der Äste wesentlich stärker abgebildet.

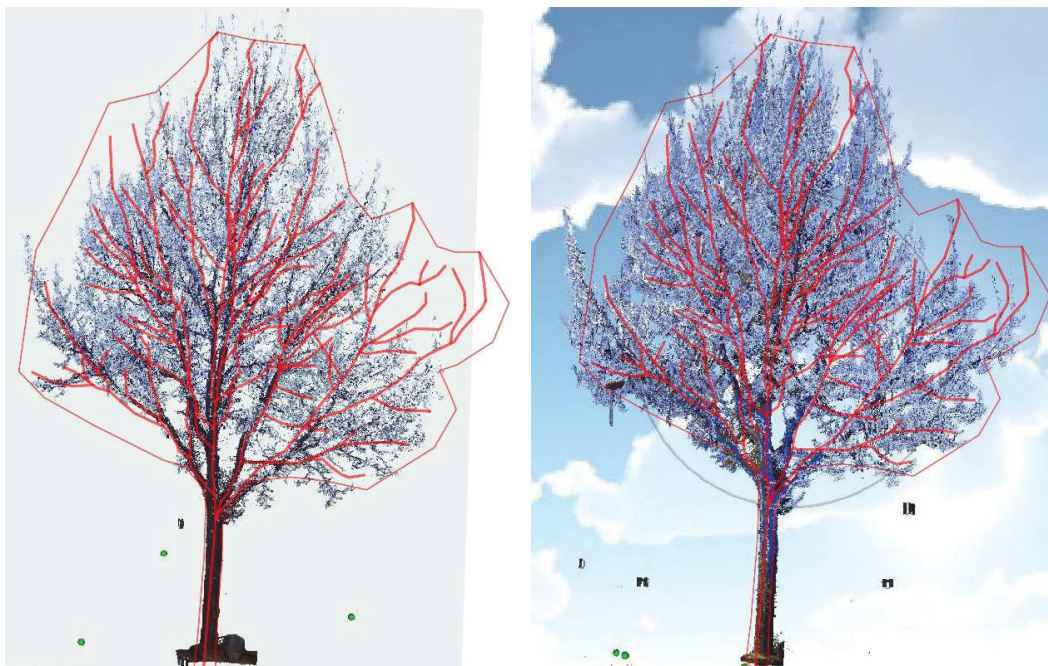


Abbildung 42: Direktvergleich des Astverlaufes mittels Linienmodell, links niedrige und rechts hohe Scaneinstellung (dargestellt in FARO SCENE, Version 7.0.0.37)

Nachteilig bei der hohen Einstellung ist, dass der Astverlauf und somit die Kronenverzweigung kaum erkennbar ist. Hierfür muss die Aufnahme entsprechend weiterbearbeitet (gefiltert) werden. In Bezug auf die Darstellung der Farbwerte ist zu erkennen, dass die Farben im Stammbereich sowie an der hellen Schnittwunde sehr gut übernommen werden und dem Original entsprechen. In beiden Aufnahmen sind bläuliche Punkte wiederzufinden, die durch das Messrauschen verursacht werden. Auch diese Punkte können durch eine Filterung reduziert werden. Insgesamt werden die Proportionen des abgebildeten Baumes korrekt dargestellt. Dadurch stehen Wuchsbreite und -höhe im richtigen Verhältnis, was ebenfalls ein wichtiges Kriterium für die menschliche Wahrnehmung ist.

### 6.3 Festlegung von Qualitätsmerkmalen

Unter Berücksichtigung von Faktoren der menschlichen Wahrnehmung ist es für die Baumdarstellung wichtig, eine hohe Detailschärfe (optische Klarheit) zu erzielen. Stammverlauf, Astverlauf, Kronenansatz, baumindividuelle Merkmale wie Astwunden und Habitusform müssen demzufolge so real wie möglich dargestellt werden und möglichst wenig Differenzen zum Original aufweisen.

Aufgrund der in Unterkapitel 6.1 festgestellten Auswirkungen der gewählten Scaneinstellungen ist eine Aufnahme in der niedrigen Einstellung (1/4 Auflösung, 3x Qualität) für Bäume kleinerer Größenordnung wie die des Baumes aus der Probeaufnahme (Eiche) zielführend.

Wegen der Feststellung erster Astspitzenverluste bei der niedrigen Scaneinstellung und unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Qualitätsmerkmale mit der Anvisierung einer hohen Detailschärfe wird für Bäume größerer und komplexerer Dimensionen jedoch eine höhere Scaneinstellung bevorzugt. Um die relativ hohe Scandauer der hohen Scaneinstellung zu reduzieren, wird eine mittlere Scaneinstellung zwischen der niedrigen und hohen gewählt. Dadurch bleibt die Auflösung von  $\frac{1}{2}$  erhalten, die aufgrund des erzielten kleinen Punktabstandes für die Aufnahme kleinerer Äste anzustreben ist. Die Qualität reduziert sich von 4x auf 3x, was ein geringeres Messrauschen, aber eine nachlassende Punktintensität durch die reduzierte Ausrichtungszeit mit sich bringt.

Auf Basis dieser Untersuchungen wird festgelegt, die kleineren Gehölze mit niedriger Scaneinstellung (1/4 Auflösung, 3x Qualität) und mittlerer Scaneinstellung (1/2 Auflösung, 3x Qualität) und die größeren Gehölze nur mit mittlerer Scanqualität (1/2 Auflösung, 3x Qualität) aufzunehmen. Die

kleineren Bäume werden in beiden Qualitäten aufgenommen, um nochmals Vergleiche zwischen beiden Qualitätsstufen zu erhalten.

Nach Abschluss der Winteraufnahmen, die in Kapitel 7.3 vorgestellt werden, wurde die Eiche probeweise noch einmal im belaubten Zustand aufgenommen um sicherzustellen, dass die gewählte mittlere Scaneinstellung für die größeren Gehölze (Auflösung =  $\frac{1}{2}$ , Qualität = 3x) auch im belaubten Zustand ausreichend ist (vgl. Anhang 1.3, Vermessungs-Protokoll vom 11.06.2017, Aufnahme Eiche, belaubt, in mittlerer Scaneinstellung S.10ff.). Die nachfolgende Abbildung zeigt die erzielte Aufnahme der Eiche im belaubten Zustand, unbearbeitet mit den oben genannten Scaneinstellungen.



Abbildung 43: Aufnahmeergebnis Eiche Aufnahmequalität mittel, Sommer (links), (dargestellt in FARO SCENE, Version 7.0.0.37) und original Foto (rechts).

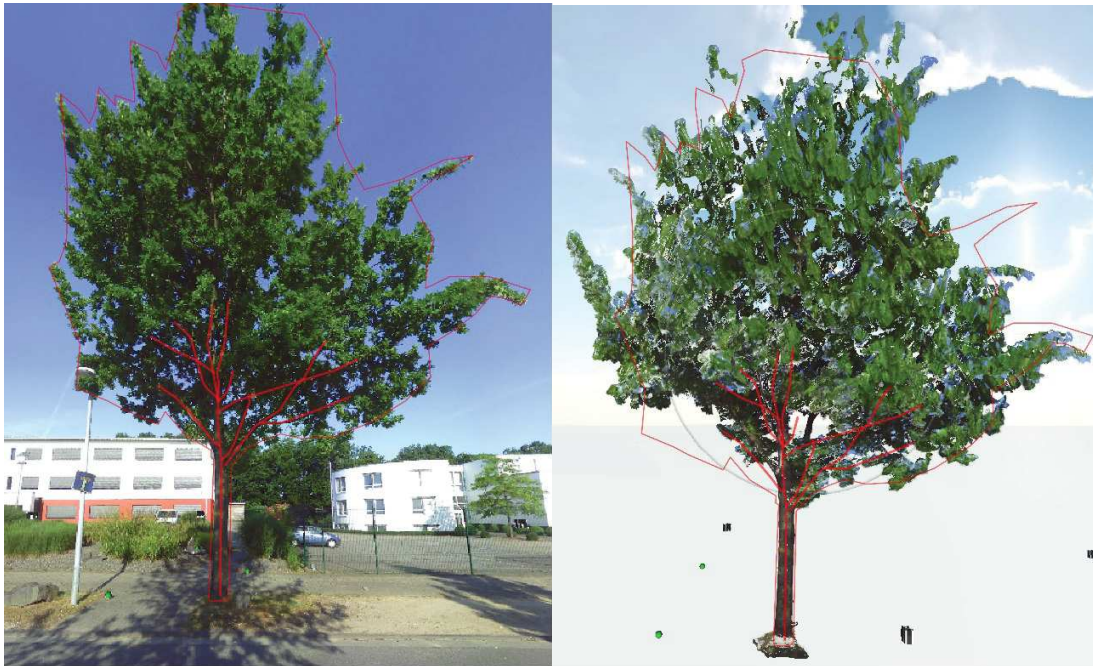
Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über Auswirkungen auf die Gesamtpunktzahl, Scanzeit und Dateigröße.

Tabelle 17: Ergebnisse aus der Probeaufnahme, Winter und Sommer

| Baum  | Aufnahmeeinstellung                              | Zustand   | Datei | Gesamt-Punktzahl | Scanzeit | Dateigröße |
|-------|--|-----------|-------|------------------|----------|------------|
| Eiche | $\frac{1}{4}$ Auflösung,<br>3x Qualität (gering) | unbelaubt | .fls  | 2.925.801        | 40 min   | 645 MB     |
| Eiche | $\frac{1}{2}$ Auflösung,<br>4x Qualität (hoch)   | unbelaubt | .fls  | 33.017.066       | 2 h      | 1,69 GB    |
| Eiche | $\frac{1}{2}$ Auflösung,<br>3x Qualität (mittel) | belaubt   | .fls  | 56.078.907       | 1h 37min | 3,75 GB    |



In *Abbildung 44* wird das Aufnahmeergebnis aus der Sommeraufnahme mit dem Originalfoto wie bei den Winteraufnahmen mit einem Linienmodell verglichen.



*Abbildung 44: Direktvergleich des Astverlaufes mittels Linienmodell, links Originalfoto und rechts mittlere Scaneinstellung Sommeraufnahme (dargestellt in FARO SCENE, Version 7.0.0.37)*

Wie auf der Abbildung ersichtlich, passen die Astanläufe im Kronenansatz überein. Aufgrund der Laubverdeckung sind diese jedoch nur ansatzweise erkennbar. Bei der Darstellung der Habitusform gibt es insbesondere im Astspitzen- und randbereich leichte Abweichungen. Diese sind auf die äußeren Windeinflüsse während der Aufnahme zurückzuführen. Gemäß Vermessungs-Protokoll (vgl. Anhang 1.3, Vermessungs-Protokoll vom 11.06.2017, Aufnahme Eiche, belaubt, in mittlerer Scaneinstellung S.10ff.) war am Aufnahmetag nur eine geringe Windstärke von max. 1,5 m/s zu verzeichnen. Ersichtlich wird daraus, dass die Blätter aufgrund ihrer größeren Angriffsfläche stärker vom Wind beeinflusst werden und somit das Ergebnis verändern. Höhere Windgeschwindigkeiten bei den unbelaubten Aufnahmen wirkten sich im Vergleich bedeutend weniger auf das Ergebnis aus.



Abbildung 45: Nahzoom Blattaufnahme

Abbildung 45 zeigt den Nahbereich der Blattaufnahme. Hieraus geht hervor, dass eine detailgetreue Aufnahme eines Einzelblattes nicht gegeben ist. Darauf aufbauend ist auf Basis der 3D-Aufnahme keine artenspezifische Blatterkennung möglich. Nichtsdestotrotz sind aus der Distanz ein klarer Habitus und eine Trennung zwischen Belaubung und Astwerk erkennbar. Unter weiterer Betrachtung der Winter- und Sommeraufnahmen (vgl. Tab. 17) wird deutlich, dass die mittlere Scaneinstellung der Sommeraufnahmen die hohe Scaneinstellung der Winteraufnahmen in Punkto Dateigröße (1:1,7) und Punktzahl (1:2,2) überschreitet. Auslöser dafür ist die zusätzliche Farbinformation der Blätter und die größere aufzunehmende Oberfläche. Aus diesem Grund ist die Wahl der hohen Scaneinstellung für die Sommeraufnahmen unter Berücksichtigung von bearbeitungstechnischen Möglichkeiten und damit verbundenen Zeitaufwendungen nicht vertretbar. Ein weiterer Aspekt besteht in der schon erwähnten längeren Scanzeit, die mit der hohen Auflösung verbunden ist. Deshalb wird auch die mittlere Scaneinstellung für die Sommeraufnahmen verwendet.

## 7 Voruntersuchung II: Programmuntersuchung und Festlegung zur Weiterverarbeitung

Nachdem auf Basis der Probeaufnahmen Qualitätsanforderungen an die Laserscan-Aufnahmen festgelegt wurden, werden im folgenden Kapitel Programme für die Weiterverarbeitung untersucht, gegenübergestellt, bewertet und ausgewählt.

### 7.1 Kriterienkatalog – Detaillierte Programmuntersuchung

Bevor eine Gegenüberstellung der einzelnen Programme zum direkten Vergleich aufgestellt werden kann, müssen diese zunächst untersucht werden. Hierzu wird für jedes Programm die in Kapitel 5.5 vorgestellte detaillierte Untersuchung durchgeführt. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Programme, die untersucht und anschließend verglichen werden. Die Programmauswahl basiert auf den in Unterkapitel 4.1.3 (Tabelle 4) aufgelisteten gängigen Softwarelösungen und der Bereitstellung einer jeweiligen Testversion vom Hersteller.

Tabelle 18: Programmübersicht zur detaillierten Untersuchung

| Nr. | Hersteller        | Programmname  |
|-----|-------------------|---------------|
| 1   | Autodesk          | ReCap         |
| 2   | Faro              | Scene         |
| 3   | Geomagic          | Wrap Studio   |
| 4   | Hexagon/Leica     | 3D-Reshaper   |
| 5   | VirtualGrid       | VRMesh Studio |
| 6   | Daniel GM         | CloudCompare  |
| 7   | Trimble           | RealWorks     |
| 8   | Leica             | Cyclone       |
| 9   | Zoller & Fröhlich | LaserControl  |

Beispielhaft wird nachfolgend die detaillierte Programmuntersuchung zu ReCap von der Firma Autodesk durchgeführt. Bei der Beschreibung der Programmfunktionen innerhalb der Bedienoberfläche beschreibt die erste Ebene all die Funktionen, die auf den ersten Blick nach Programmstart sichtbar sind. Die weiteren Ebenen werden erst nach und nach über Pulldown-Menüs sichtbar. Alle Funktionen, die mit einem Sternchen „\*“ gekennzeichnet sind, stehen in der vorliegenden Lizenz nicht zur Verfügung.



Tabelle 19: Programmuntersuchung Autodesk ReCap (AUTODESK 2017 b; AUTODESK ReCAP360, Version 4.2.0.2).

| Hersteller/<br>Programmname            | <b>Autodesk<br/>ReCap360</b>  |  |   |
|--|---|--|---|
| Version                                | Recap Student, Version 4.2.0.2  |  |   |
| System-/Drittanbieter                  | Drittanbieter   |  |   |
| Allgem. Hersteller- Beschreibung       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Punktwolkenvisualisierung, -bearbeitung und -bereinigung</li> <li>- Panoramavisualisierung</li> <li>- automatische Registrierung*</li> <li>- fotorealistische Datenvisualisierung mit Farbwerten</li> <li>- Video-Tool*</li> </ul> |  |   |
| Programmfunktionen<br>Bedienoberfläche |   |  |   |
| 1. Ebene                               | 2. Ebene  | 3. Ebene   | 4. Ebene  |
| Startseite (Startmenü)                 | Speichern   | Speichern unter  |   |
|  | Öffnen  | Zuletzt verwendete Projekte                                      |   |
|  | Gelöschte Punkte wiederherstellen   |  |   |
|  | Importieren   | Exportieren<br>Zugeordnete Projekte*<br>Exportieren von Bildern* |   |
|  | Einstellungen   |  |   |
|  | Hilfe   | Info über Autodesk   |   |
|  | Beenden des Programms   |  |   |
| Anzeigeeinstellungen                   | Farbmodus   | RGB<br>Höhe<br>Intensität<br>Normal<br>Scanposition              |   |
|  | Beleuchtungs-einstellungen  | Seitenbeleuchtung<br><br>Shader-Model<br><br>Kantenhervorhebung  | Einzel<br>Doppelt<br>Keine<br>Lambert<br>Phong<br>Vorgabe<br>Transparent<br>Keine |

|              |   |   |   |
|--------------|---|---|---|
|              | Punkte  | Punktanzeige<br>Ursprung aktualisieren<br>Ursprung zurücksetzen |   |
|              | UI-Elemente ein-/ausblenden   | Spielgelkugeln<br>Beschriftung<br><br>Perspektive<br>Extras     | Bemaßung<br>Anmerkung<br><br>Navigation<br>Nav.-Tipps<br>Raster ein/aus<br>RealView<br>Rückgängig<br>ViewCube |
|              | Farben im Hintergrund*  |   |   |
| Navigieren   | Fenster   | Fenster<br>Grenzen  |   |
|              | Schwenken   |   |   |
|              | Orbit   |   |   |
|              | Blicken   |   |   |
|              | 3D-Navi   |   |   |
| Suche*       |   |   |   |
| Datenservice | Bereinigen (für strukturierte Scans<br>(Objekt-) Netz<br>(für strukturierte Scans)<br>Weitere Informationen<br>(Feedbackoption) |   |   |
| Fenster      | Fenster<br>Zaun<br>Ebene  |   |   |
| Anmerkung    | 3-Punkt<br><br>Abstand<br>Anmerkung   | Flächen<br>3-Punkt  |   |
| Begr.feld    | Bearbeiten<br>Auswählen   |   |   |

|                   |                      |   |  |
|-------------------|----------------------|---|--|
|                   | Zurücksetzen         |   |  |
| Projekt Navigator | Angehängte Projekte* |   |  |
|                   | Beschriftungen       | Als CSV exportieren<br>Als CSV importieren                                |  |
|                   | Scanpositionen       |   |  |
|                   | Scanbereiche         | Bereiche exportieren<br>Bereiche import. CSV*<br>Erstellung v. Bereichen* |  |
|                   | Ansichtsstatus       | Alphabetisch sortiert<br>Neuen erstellen                                  |  |

|                            |  |
|----------------------------|--|
| Imporformate               | .rcs, .fls, .fws, .lsproj, .ptg, .pts, .ptx, .las, .laz, .zfs, .zfprj, .cl3, .clr, .e57, .rdbx, .rsp, .txt, .xyz, .rcp, .dp, .prj, .xyb  |
| Exportformate              | .rcp, .rcs, .pts, .e57   |
| Beschreibung Importvorgang | <ul style="list-style-type: none"><li>- Startseite (Startmenü) → Importieren → Auswahl aus dem Computernetzwerk</li><li>- treffen von Scaneinstellungen → Scanfilter (Minimal, Standard oder Aggressiv)<ul style="list-style-type: none"><li>→ Punkte zuschneiden (nach Bereich und Intensität)</li><li>→ Erweitert (Rasterdezimierung, Koordinatensystem und Achseneinrichtung)</li></ul></li></ul> |

|  |  |
|--|--|
| Bewertung Benutzerfreundlichkeit   | <p><u>Positiv:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- erster Eindruck → übersichtliche und aufgeräumte Bedienoberfläche</li> </ul> <p><u>Negativ:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- teilweise tiefe Strukturen bis in die 4. Ebene</li> <li>- wenige Funktionen stehen zur eigentlichen Bearbeitung der Punktwolke zur Verfügung</li> <li>- Toolbars vereinzelt über den kompletten Bildschirmrand verteilt</li> <li>- einige Pro-Funktionen nicht verfügbar</li> </ul> |
| <p>Schwierigkeiten während der Benutzung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- kein Zusammenführen der Einzelscans als .fls möglich (Eiche, hohe Scaneinstellung, 1,69 GB; Eiche niedrige Scaneinstellung jedoch möglich, 645 MB)</li> </ul> |  |

Durch die aufgeführten Schwierigkeiten während der Programmnutzung und die jeweiligen Vor- und Nachteile lassen sich erste Programmeindrücke und Tendenzen ableiten. Weiterhin wird ein Eindruck über die Funktionsbreite und das Leistungsspektrum gegeben. Alle anderen detaillierten Programmuntersuchungen sind im Anhang unter Kapitel 2. Detaillierte Programmuntersuchungen, ab S.14ff. zu finden. Die gewonnenen Informationen aus den Programmuntersuchungen werden in der nachfolgenden Tabelle zum direkten Vergleich gegenübergestellt (Erläuterungen zu den jeweiligen Angaben, vgl. Unterkapitel 5.5).

Tabelle 20: Gegenüberstellung der Programminformationen aus der detaillierten Programmuntersuchung

| Programme |               |                 |                           |                        |                        |                           | Funktionen:   | Importformate |                     |             |      |      |      |      |      |      |      | Exportformate |      |      |      |         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |         |
|-----------|---------------|-----------------|---------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|---------------|---------------|---------------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|---------------|------|------|------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------|
| Nr.       | Programmname: | Hersteller:     | Version & Datum:          | System-/ Drittanbieter | Benutzerfreundlichkeit | Benutzungseinschränkungen | Registrierung | Filterung     | Dreiecksvermaschung | Darstellung | .xyz | .ptx | .pts | .lgs | .wrl | .E57 | .fls | .pod          | .rcp | .stl | .obj | .lsproj | .xyz | .ptx | .pts | .lgs | .wrl | .E57 | .fls | .pod | .rcp | .stl | .obj | .lsproj |
| 1.        | ReCap 360     | Autodesk        | 4.2.0.2 [06.07.2017]      | DA                     |                        |                           | ✓ (✓)(✓)      | ✓             | ✓                   | ✓           | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓             | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       |
| 2.        | SCENE         | FARO            | 6.2.4.30 [15.08.2017]     | SY                     |                        |                           | ✓             | ✓             | ✓                   | ✓           | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓             | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       |
| 3.        | Wrap          | Geomagic Studio | 2017 [15.08.2017]         | DA                     |                        |                           | ✓             | ✓             | ✓                   | ✓           | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓             | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       |
| 4.        | 3DReshaper    | Hexagon/Leica   | 17.0.24386.0 [01.02.2017] | DA                     |                        |                           | ✓             | ✓             | ✓                   | ✓           | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓             | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       |
| 5.        | VRMesh Studio | Virtual Grid    | 9.4.0 [21.04.2017]        | DA                     |                        |                           | ✓             | ✓             | ✓                   | ✓           | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓             | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       |
| 6.        | CloudCompare  | Daniel GM       | v2.9.beta [17.09.2017]    | DA                     |                        |                           | ✓             | ✓             | ✓                   | ✓           | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓             | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       |
| 7.        | RealWorks     | Trimble         | 10.3 [21.04.2017]         | SY                     |                        |                           | ✓             | ✓             | ✓                   | ✓           | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓             | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       |
| 8.        | Cyclone       | Leica           | 09.01.2006 (19.07.2017)   | SY                     | K.A.                   | K.A.                      | ✓             | ✓             | ✓ (✓)               | ✓           | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓             | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       |
| 9.        | LaserControl  | Z+F             | 8.9.1 (19.07.2017)        | SY                     |                        |                           | ✓ (✓)         | ✓             | ✓                   | ✓           | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓             | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    | ✓       |

(✓) Funktion nicht in vorliegender Version, nur in Pro-Version verfügbar

In Tabelle 20 ist zu berücksichtigen, dass nicht alle programmunterstützten Import- und Exportformate aufgeführt werden, sondern lediglich die am häufigsten verwendeten und somit hier weiter behandelten. Hieraus lassen sich für den Programmaustausch kompatible Dateiformate ableiten. Die am häufigsten auftretenden Importformate sind .xyz, .ptx, und .pts. Die am häufigsten auftretenden Exportformate sind .pts und .obj. Die Programme Z+F LaserControl und VRMesh Studio weisen sowohl eine hohe Benutzungseinschränkung als auch eine geringe Benutzerfreundlichkeit auf. Weitere erhebliche Benutzungseinschränkungen sind bei Autodesk ReCap zu verzeichnen. Faro Scene und 3D-Reshaper fallen aufgrund einer hohen Benutzerfreundlichkeit und keinerlei Benutzungseinschränkungen positiv auf. Auf die Tabelle wird im weiteren Verlauf der Programmauswahl immer wieder Bezug genommen.

### **7.2 Wahl der Softwarelösung zum Auslesen und Darstellen von Baum-Punktwolken**

Sowohl für die reine Darstellung als auch die Weiterverarbeitung (Unterkapitel 7.3) der Punktwolke ist zunächst die Ausgangslage entscheidend. Durch die Aufnahme mit dem Faro Laserscanner liegen die Roh-Scandaten als .fls-Datei vor. Folglich muss die Weiterverarbeitungssoftware eine Importmöglichkeit für .fls-Dateien bieten. Nach dem Datenimport besteht die Möglichkeit, mit Hilfe der .fls kompatiblen Programmen weitere Export-Formate als Ausgangsbasis zu schaffen. Die nachfolgende Grafik gibt einen Überblick (vgl. auch Tabelle 20).



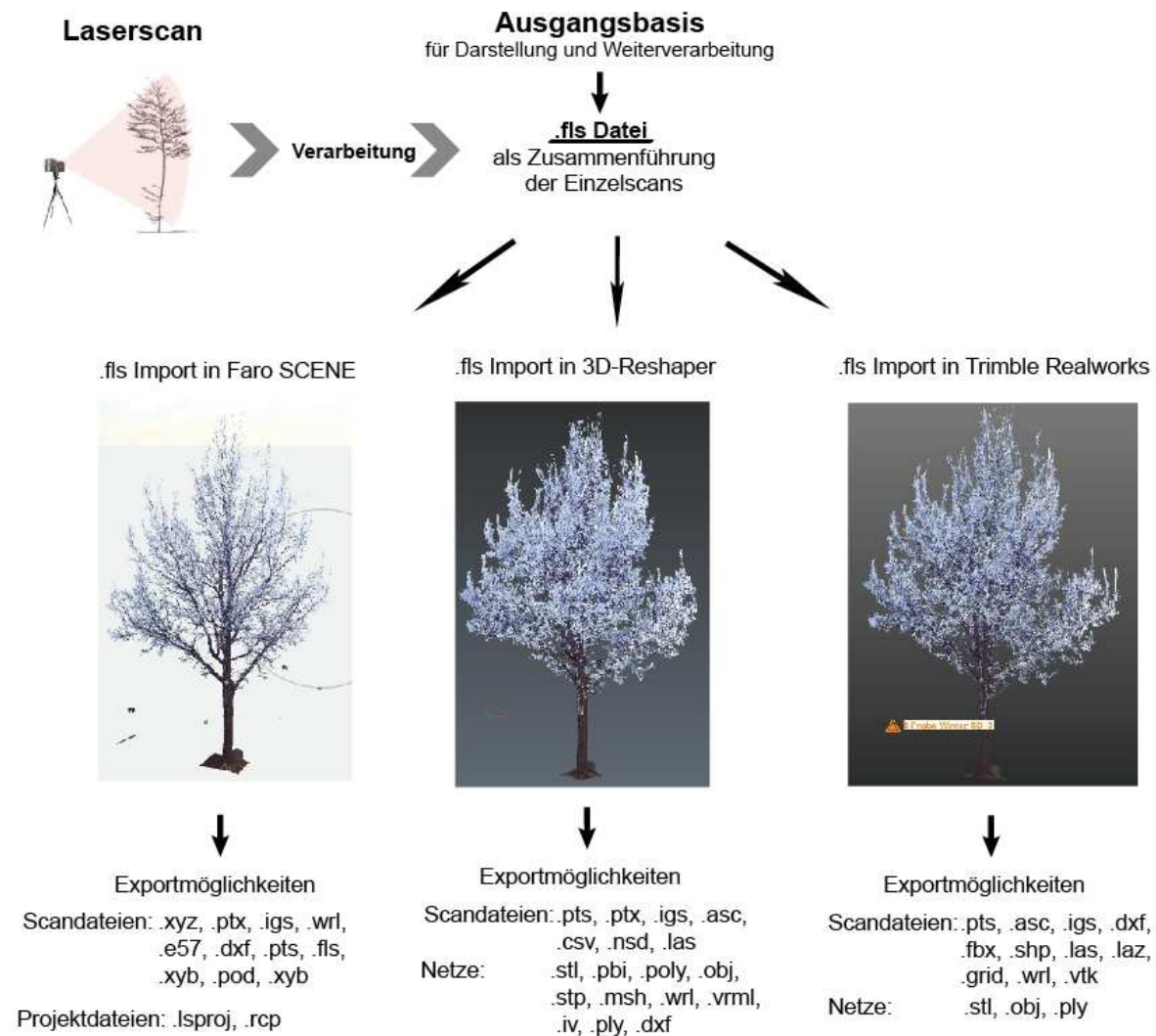


Abbildung 46: Möglichkeiten zum Import von .fls-Dateien zur späteren Weiterverarbeitung (FARO SCENE, Version 7.0.0.39, 3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0, TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3).

Da die anderen untersuchten Programme keinen direkten Import der Scan-Datei ermöglichen, werden zunächst die drei oben aufgeführten Programme genauer betrachtet. Die nachfolgende Tabelle gibt einen direkten Vergleich über den Import der .fls-Datei.

Tabelle 21: Import der Test-Scanobjekte in 3D-Resahper, Faro Scene und Trimble RealWorks

| Scanobjekt  | Programm               | Datei | Da-<br>tei-größe | Punkt-an-<br>zahl | Importzeit    |
|---|------------------------|-------|------------------|-------------------|---------------|
| Eiche unbelaubt, niedrige<br>Scan-einstellung (1/4 Auf-<br>lösung, 3x Qualität) | 3D-Reshaper            | .fls  | 645 MB           | 2.925.801         | 5 min 37 sek. |
|   | Faro Scene             |       |                  |                   | 1 min 10 sek  |
|   | Trimble Real-<br>Works |       |                  |                   | 19 min        |

|   |             |      |         |            |               |
|---|-------------|------|---------|------------|---------------|
| Eiche, belaubt, mittlere Scaneinstellung (1/2 Auflösung, 3x Qualität) | 3D-Reshaper | .fls | 2,92 GB | 56.078.907 | 10 min 15 sek |
|   | Faro Scene  |      |         |            | 4 min 32 sek  |
| Eiche unbelaubt, hohe Scaneinstellung (1/2 Auflösung, 4x Qualität)    | 3D-Reshaper | .fls | 1,69 GB | 33.017.066 | 18 min 05 sek |
|   | Faro Scene  |      |         |            | 7 min 40 sek  |

Wie Tabelle 21 zeigt, ist die .fls-Importzeit in Trimble RealWorks bereits bei der niedrigen Scaneinstellung deutlich höher als bei den beiden anderen Programmen Faro Scene (mehr als 11-mal so lange) und 3D-Reshaper (mehr als 3-mal so lange). Aus diesem Grund wird Trimble RealWorks zunächst als direktes .fls-Importprogramm ausgeschlossen. Die Importzeiten bei 3D-Reshaper dauern im Vergleich zu Faro Scene bei niedriger und mittlerer Scaneinstellung mehr als doppelt so lange. Grund hierfür ist, dass Faro als Hersteller des Scanners seine Programme speziell auf die Verarbeitung von .fls-Dateien ausgerichtet hat.

Vergleicht man die Daten noch einmal mit der in Unterkapitel 6.3 ausgeschlossenen hohen Scaneinstellung (1/2 Auflösung, 4x Qualität, Tabelle 17) bei der unbelaubten Aufnahme, fällt auf, dass hier im Vergleich zur mittleren Scaneinstellung trotz kleinerer Dateigröße ein längerer Importvorgang anfällt. Unter dem Ziel der Reduzierung von längeren Bearbeitungszeiten bekräftigt dies die Festlegungen zur Durchführung von größeren Baumscans in mittlerer Einstellung.

Für den direkten .fls-Dateiimport bleiben folglich nur noch die Programme 3D-Reshaper und Faro Scene übrig. Im nachfolgenden werden die importierten Punktwolken für einen optischen Vergleich in folgender Reihenfolge gegenübergestellt: Original – 3D-Reshaper – Faro Scene



Abbildung 47: Direktvergleich Eiche unbelaubt, niedrige Scaneinstellung Original - 3D-Reshaper - Faro Scene (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0; FARO SCENE, Version 6.2.4.30)



Abbildung 48: Direktvergleich Eiche belaubt, mittlere Auflösung Original - 3D-Reshaper - Faro Scene (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0; FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

Bei dem Vergleich der Darstellungen in 3D-Reshaper und Faro Scene mit den originalen Fotoaufnahmen fällt auf, dass in Scene durch eine klarere Darstellung eine höhere Detailschärfe als in 3D-Reshaper erzielt wird. Dadurch werden Astverläufe komplett bis in die Spitzen ersichtlich, während in 3D-Reshaper nur Astanläufe und Habitusumrisse erkennbar sind. Im belaubten Zustand (Abbildung 48) sind durch die höhere Detailschärfe die Blattoberfläche und -lücken deutlicher erkennbar. 3D-Reshaper wiederum stellt die Blattoberfläche verschwommener und undurchsichtiger dar. Dasselbe Phänomen spiegelt sich bei den unbelaubten Aufnahmen wieder. Bei der niedrigen Scaneinstellung sind neben den bereits erwähnten Astverläufen auch die Astspitzen und der Astverlauf im Kronenbereich in Scene deutlicher dargestellt.

Neben Faro Scene und 3D-Reshaper können die Punktwolken auch in anderen Programmen dargestellt werden. Hierzu muss, wie in Kapitel 6 kurz erwähnt, die .fls-Datei zuerst in eines der beiden oben erwähnten Programme importiert werden, um die Datei dann in ein entsprechendes programmkompatibles Format zu exportieren. Weiterhin müssen die Export- und Importmöglichkeiten der jeweilig eingesetzten Software verglichen werden. Bei mehreren kompatiblen Formaten gilt es, das optimale Format jeweils zu ermitteln. Aufgrund der deutlich schnelleren .fls-Importzeit (vgl. Tabelle 21) und der höheren Vielfalt an Exportformaten (vgl. Abbildung 46 und Tabelle 20) in Faro Scene gegenüber 3D-Reshaper werden in der nachfolgenden Tabelle einige Exporte beider Probeaufnahmen durchgeführt und dokumentiert.

Tabelle 22: .fls-Exportmöglichkeiten und Zeitaufwendungen in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

| Scanobjekt                                   | Ausgangs-Datei | Größe   | Dauer Impo.     | Export-Datei | Dauer Expo.             | Größe   | Dauer Gesamtzeit     |
|--|----------------|---------|-----------------|--------------|-------------------------|---------|----------------------|
| Eiche, un-belaubt<br>niedrige<br>Einstellung | .fls           | 645 MB  | 1 min<br>10 sek | .e57         | 51 sek                  | 65,4 MB | 2 min 1 sek          |
|  |                |         |                 | .pts         | 1 min                   | 142 MB  | 2 min 10 sek         |
|  |                |         |                 | .wrl         | 1 min<br>31 sek         | 193 MB  | 2 min 41 sek         |
|  |                |         |                 | .pod         | 1 min<br>56 sek         | 47,8 MB | 3 min 6 sek          |
|  |                |         |                 | .igs         | 1 min<br>33 sek         | 571 MB  | 2 min 43 sek         |
|  |                |         |                 | .ptx         | 16 min                  | 2,27 GB | 17 min 10 sek        |
|  |                |         |                 | .xyz         | 57 sek                  | 154 MB  | 2 min 7 sek          |
|  |                |         |                 | .rcp         | 45 min<br>15 sek        | 998 MB  | 46 min 25 sek        |
| Eiche, be-laubt,<br>mittlere<br>Qualität     | .fls           | 2,92 GB | 4min<br>32sek   | .e57         | 3 min<br>24 sek         | 1,36 GB | 7 min 56 sek         |
|  |                |         |                 | .pts         | 7 min<br>16 sek         | 2,65 GB | 11 min 48 sek        |
|  |                |         |                 | .wrl         | 22 min<br>13 sek        | 3,75 GB | 26 min 45 sek        |
|  |                |         |                 | .pod         | 8 min<br>35 sek         | 605 MB  | 13 min 7 sek         |
|  |                |         |                 | .igs         | 21 min<br>20 sek        | 9,87 GB | 25 min 52 sek        |
|  |                |         |                 | .ptx         | 2 h<br>28 min<br>25 sek | 29,5 GB | 2 h 32 min 57 sek    |
|  |                |         |                 | .xyz         | 10 min<br>10 sek        | 3,14 GB | 14 min 42 sek        |
|  |                |         |                 | .rcp         | 2 h<br>28 min<br>10 sek | 1,76 GB | 2 h 32 min<br>42 sek |

Vergleicht man die Exportmöglichkeiten, reduziert sich bei der mittleren Aufnahmeeinstellung die Dateigröße bei einem Export in eine .e57, .pts, und .pod-Datei. Bei der niedrigen Qualität reduziert sich die Dateigröße bei allen Exportformaten, bis auf die .ptx und .rcp-Datei. Ein Export als .ptx-Datei ist aufgrund der langen Exportzeit und einer über zehnmal (mittlere Scaneinstellung) bzw. über dreimal so hohen (niedrige Scaneinstellung) Dateigröße auszuschließen, genauso wie der Export in eine .igs-Datei (über dreimal so groß, mittlere Scaneinstellung). Zudem werden bei einer .igs-Datei keine Farbwerte übernommen. Weiterhin auszuschließen ist der Export in eine .xyz-Datei, da hier bei den durchgeführten Aufnahmen im Ergebnis nur eine zweidimensionale Ansicht des Baumes generiert wird. Auch der Export in eine .rcp-Datei ist mit einem sehr hohen Zeitaufwand verbunden.

Folgende Möglichkeiten bleiben für die Darstellung der 3D-Punktwolke offen (vgl. Tabelle 20):

- |              |                                   |                                    |
|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| - Faro Scene | → Export als .pod-Datei           | → Import in Bentley Pointools View |
| - Faro Scene | → Export als .wrl-Datei           | → Import in Geomagic Wrap          |
| - Faro Scene | → Export als .e57-Datei           | → Import in CloudCompare           |
| - Faro Scene | → Export als .pts-Datei           | → Import in Z&F LaserControl       |
| - Faro Scene | → Projeklexport als .rcp-Datei    | → Import in Autodesk ReCap         |
| - Faro Scene | → Export als .pts oder e.57-Datei | → Import in Trimble Realworks      |
| - Faro Scene | → Export als .pts-Datei           | → Import in VRMesh Studio          |

Neben den in Tabelle 18 genannten Programmen gibt es eine Vielzahl an kostenlos zur Verfügung gestellten Viewer-Programmen wie z.B. Bentley Pointools View. In diesen Programmen ist zumeist nur eine reine Punktwolkendarstellung möglich. Anwendungen sind auf einfache Messfunktionen begrenzt.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Eiche im unbelaubten- und belaubten Zustand als exportierte Datei in den jeweils oben aufgeführten Programmen, in folgender Reihenfolge: Bentley Pointools View – Geomagic Wrap – CloudCompare – Z&F LaserControl – Autodesk ReCap – Trimble RealWorks – VRMesh Studio – 3D-Reshaper – Faro Scene



Eiche unbelaubt, niedrige Scaneinstellung:

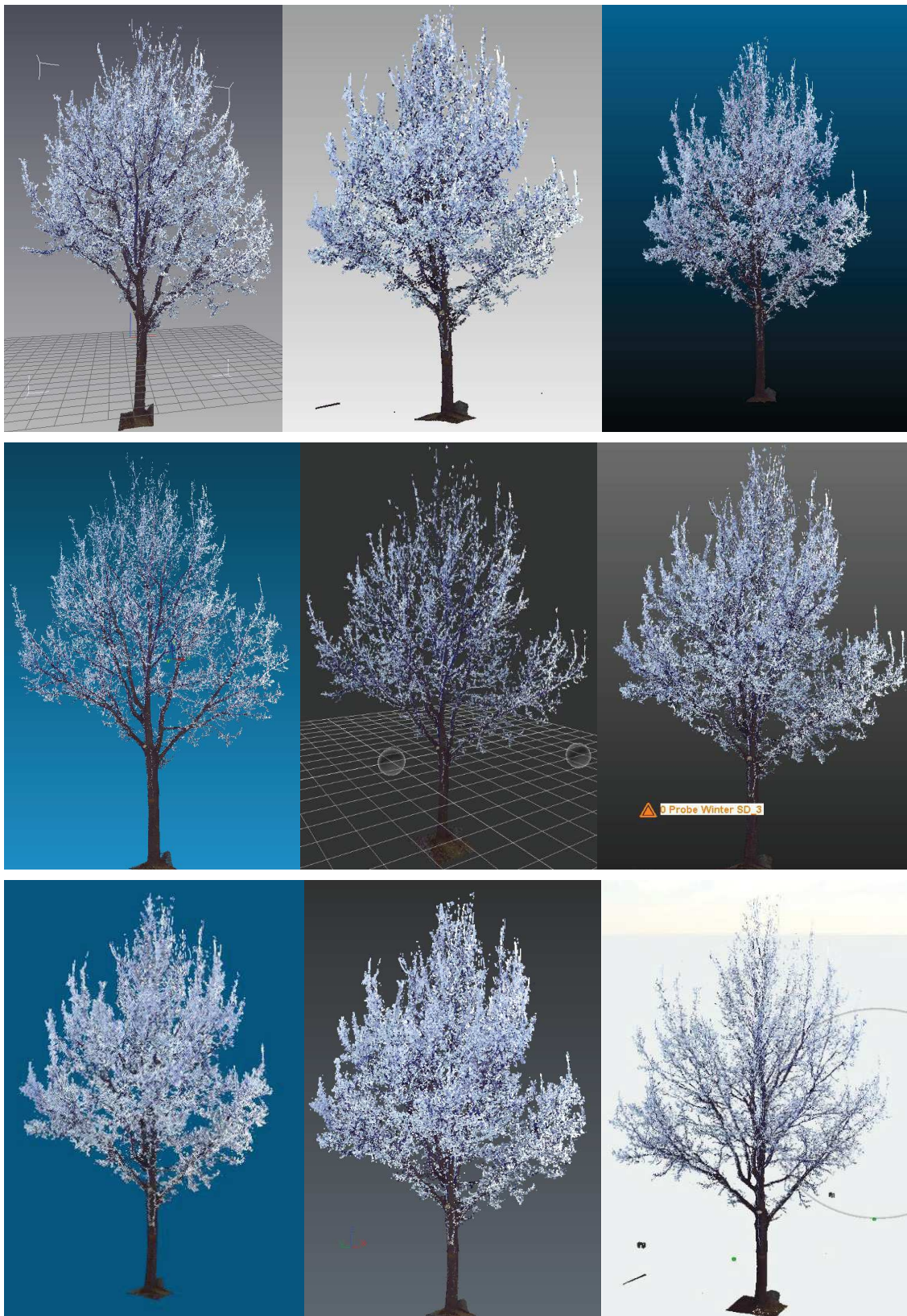


Abbildung 49: Punktwolkendarstellung Eiche unbelaubt, importiert in unterschiedlichen Programmen (BENTLEY POINTOOL, Version 02.00.01.00; GEOMAGIC WRAP, Version 2017; CLOUDCOMPARE, Version V2.9beta; Z+F LASERCONTROL®, Version 8.9.1.21205; AUTODESK RECAP360, Version 4.2.0.2; TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3; VRMESH STUDIO, Version 9.4.0; 3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0; FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

Vergleicht man die oben aufgeführten Darstellungen in den unterschiedlichen Programmen, weisen insbesondere Bentley Pointools View, Z&F LaserControl und Autodesk ReCap eine hohe Detailschärfe auf. Äste sind bis in die Spitzen sichtbar und werden nicht durch Messrauschpunkte verdeckt. Bei Trimble RealWorks sind die Astverläufe noch ansatzweise erkennbar, während sie in VRMesh Studio, Geomagic Wrap und CloudCompare größtenteils verdeckt werden. Hier werden Messrauschfehler weniger kompensiert. Details wie Astwunden und Farbübernahmen werden in allen Programmen korrekt dargestellt.



Eiche belaubt, mittlere Scaneinstellung:

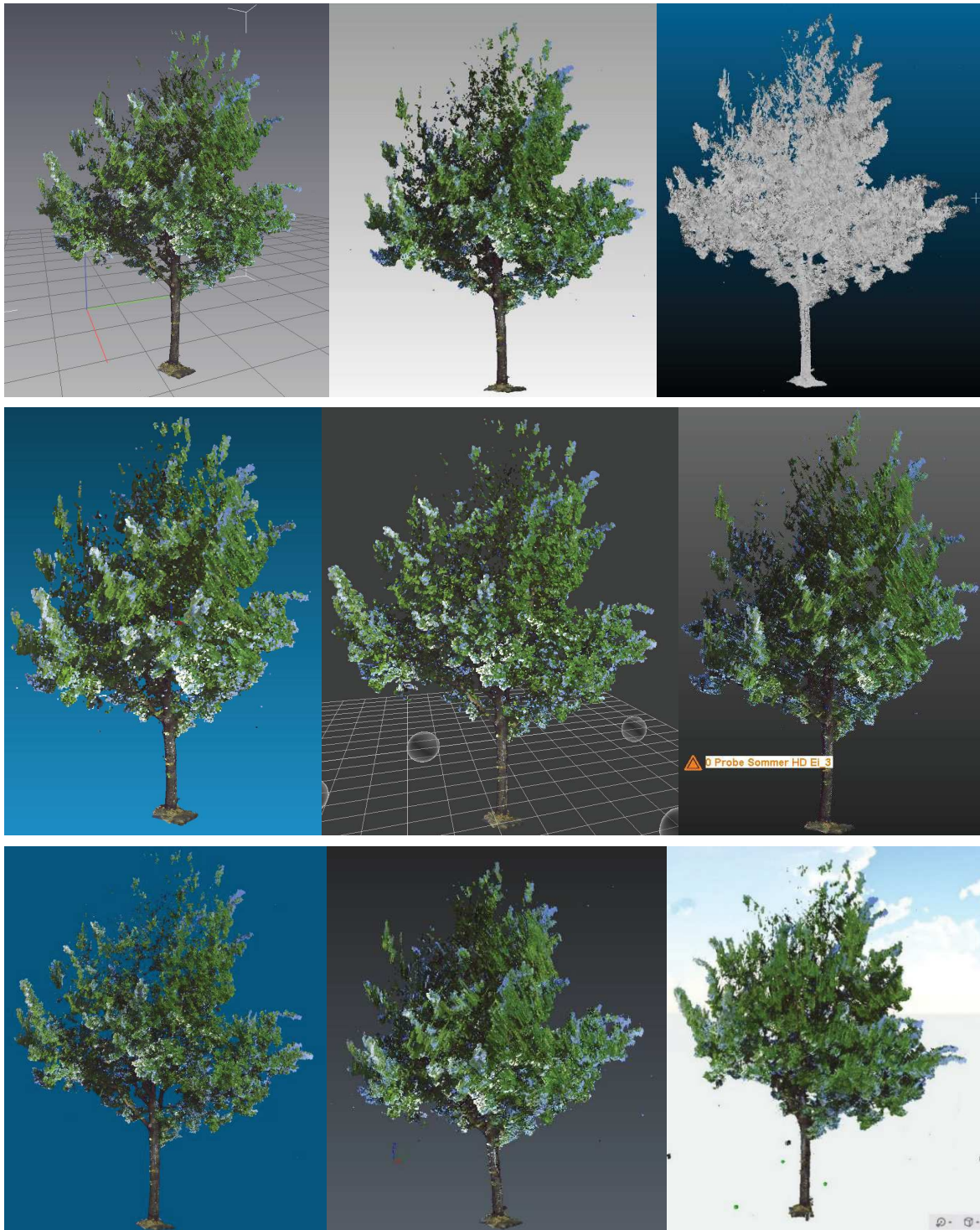


Abbildung 50: Punktwolkendarstellung Eiche belaubt, importiert in unterschiedlichen Programmen (BENTLEY POIN-TOOL, Version 02.00.01.00; GEOMAGIC WRAP, Version 2017; CLOUDCOMPARE, Version V2.9beta; Z+F LASERCONTROL®, Version 8.9.1.21205; AUTODESK RECAP360, Version 4.2.0.2; TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3; VRMESH STUDIO, Version 9.4.0; 3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0; FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

Beim Import der .e57 Datei in CloudCompare werden keine Farbwerte übertragen. Vergleicht man die oben aufgeführten Abbildungen miteinander, ist auch hier die Darstellung der Detailschärfe in Bentley Pointools View und ReCap positiv hervorzuheben. Die Darstellungen in Z&F LaserControl und Geomagic Wrap sind wiederum verschwommener in der Darstellung der Blattoberfläche. Die Farbwerte werden in den restlichen Programmen korrekt übertragen.

Aufgrund der schnellen Importzeit, der direkten Importmöglichkeit, der Vermeidung von zeitaufwendigen Exportvorgängen, einer guten Widerspiegelung der Detailschärfe, einer benutzerfreundlichen Oberfläche (vgl. Tabelle 20) und der Verfügbarkeit von mehreren Exportformaten, eignet sich Faro Scene für die reine Baumpunktwolkendarstellung am besten. Der zeitaufwendige Export in ein anderes Datenformat zur Darstellung in anderen Programmen (vgl. Tabelle 21 und Tabelle 22) ist somit nicht lohnenswert.

### **7.3 Wahl der Softwarelösung zur weiteren Bearbeitung von Punktwolken**

Neben der reinen Punktwolkendarstellung spielen die individuellen Weiterbearbeitungs-funktionen der Programme eine entscheidende Rolle. In Unterkapitel 4.1.3 wurde aufgeführt, welche Schritte von der Punktwolke bis zur Visualisierung notwendig sind (Registrierung, Filterung, Dreiecksvermaschung und Texturierung). Da die Farbübernahme automatisch erfolgt, wird auf den Vorgang der Texturierung nicht gesondert eingegangen. Bei den restlichen Weiterverarbeitungsschritten werden nur automatisierte Funktionen behandelt. Manuelle Einzelbearbeitungsmöglichkeiten werden aus wirtschaftlichen Gründen nicht in Betracht gezogen, da diese die Weiterverarbeitungszeit massiv erhöhen würden. Auf vielfache Kombinationsmöglichkeiten eines einzelnen Bearbeitungsschrittes innerhalb mehrerer Programme kann aus zeitlichen Gründen nicht eingegangen werden. Die nachfolgende Tabelle (Auszug aus Tabelle 20) gibt einen Überblick, welche Funktionen in welchen Programmen vorhanden sind.

Tabelle 23: Programmfunktionen im Überblick (AUTODESK ReCap360, Version 4.2.0.2; FARO SCENE, Version 6.2.4.30; GEOMAGIC WRAP, Version 2017; 3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0; VRMESH STUDIO, Version 9.4.0; CLOUDCOMPARE Version V2.9beta; TRIMBLE REALWORKS, Version 10; LEICA CYCLONE, Version 9.1.6; Z+F LASERCONTROL, Version 8.9.1.21205)

| Programme |               |                 |                           | Funktionen:   |           |                     |             |
|-----------|---------------|-----------------|---------------------------|---------------|-----------|---------------------|-------------|
| Nr.       | Programmname  | Hersteller:     | Version & Datum:          | Registrierung | Filterung | Dreiecksvermaschung | Darstellung |
| 1.        | ReCap 360     | Autodesk        | 4.2.0.2 [06.07.2017]      | ✓             | (✓)       | (✓)                 | ✓           |
| 2.        | SCENE         | FARO            | 6.2.4.30 [15.08.2017]     | ✓             | ✓         | ✓                   | ✓           |
| 3.        | Wrap          | Geomagic Studio | 2017 [15.08.2017]         | ✓             | ✓         | ✓                   | ✓           |
| 4.        | 3DReshaper    | Hexagon/Leica   | 17.0.24386.0 [01.02.2017] | ✓             | ✓         | ✓                   | ✓           |
| 5.        | VRMesh Studio | Virtual Grid    | 9.4.0 [21.04.2017]        | ✓             | ✓         | ✓                   | ✓           |
| 6.        | CloudCompare  | Daniel GM       | v2.9.beta [17.09.2017]    | ✓             | ✓         | ✓                   | ✓           |
| 7.        | RealWorks     | Trimble         | 10.3 [21.04.2017]         | ✓             | ✓         | ✓                   | ✓           |
| 8.        | Cyclone       | Leica           | 09.01.2006 (19.07.2017)   | ✓             | ✓         | (✓)                 | ✓           |
| 9.        | LaserControl  | Z+F             | 8.9.1 (19.07.2017)        | ✓             | (✓)       | ✗                   | ✓           |

(✓) Funktion nicht in vorliegender Version, nur in Pro-Version verfügbar

Aufgrund der im Zuge der Aufnahme von dem Faro-Laserscanner automatisch durchgeführten Registrierung (vgl. Unterkapitel 6.1) werden nun die einzelnen Weiterverarbeitungsschritte der Filterung, Dreiecksvermaschung und Visualisierung genauer untersucht. Hierbei ergeben sich verschiedene Kombinationsmöglichkeiten. Eine Punktwolke kann ohne, mit einer und mehreren Filterungen vermascht werden. Wie man aus der oberen Tabelle entnehmen kann, besitzen die meisten der untersuchten Programme alle Funktionen, wobei auch Kombinationen untereinander möglich sind.

Im ersten Schritt werden die Filterfunktionen der einzelnen Programme getestet. Hierzu werden sowohl die Einstellungen als auch die Ergebnisse dargestellt. Die für die Filterung verwendeten Einstellungen wurden vorab durch mehrere Testdurchläufe als Optimum festgelegt. Nach der Ausschließung einiger Exportformate in Unterkapitel 7.2 zeigt die nachfolgende Abbildung, welche sinnvollen Exportmöglichkeiten für die Weiterverarbeitung unterhalb der Programme möglich sind.

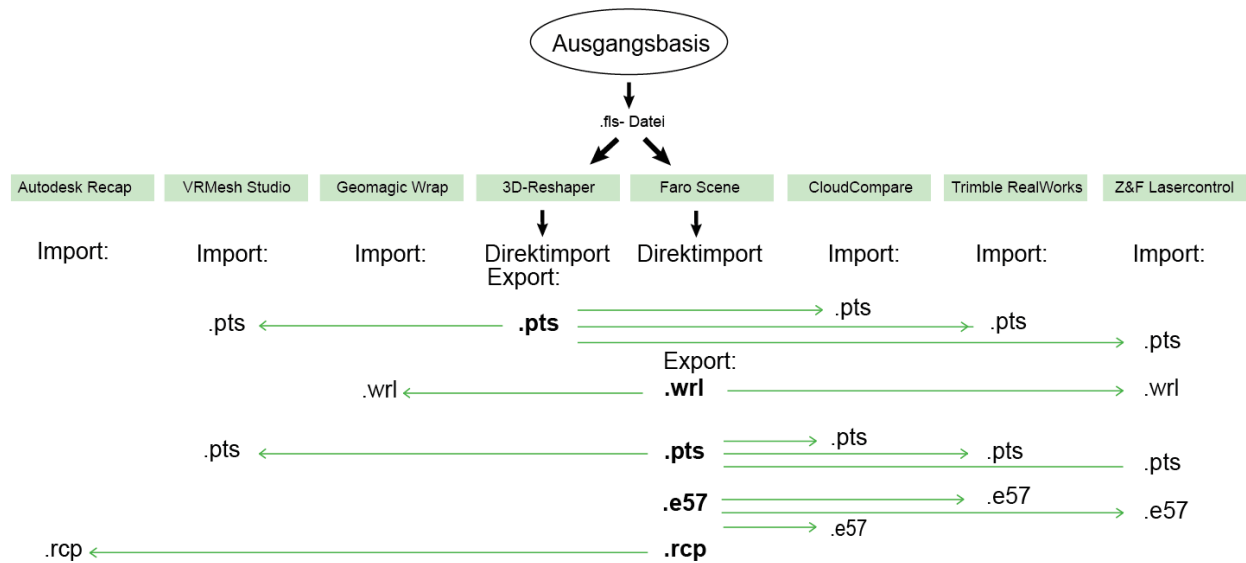


Abbildung 51: Übersicht Exportmöglichkeiten zur Weiterverarbeitung der Punktwolken

### Filterung mit Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30):

Folgende Filtereigenschaften wurden vorab eingestellt:

- Filter für dunkle Scanpunkte → deaktiviert, da Farbwerte mit übernommen werden sollen
- Abstandsfiler aktiviert, mit folgenden Einstellungen: minimaler Abstand 0 m, maximaler Abstand 200 m (Test: Gesamtpunktzahl verändert sich nicht bei Variationen)
- Streupunktfiler aktiviert, mit folgenden Einstellungen: Gittergröße 3px, Abstandsgrenzwert 0,025 m, Zuordnungsgrenzwert 100 % (durch mehrere Vergleiche wurden durch diese Einstellungen die maximale Punktfilerung und das beste Ergebnis erzielt)
- Kantenelementfiter aktiviert, ohne Möglichkeiten zur detaillierteren Einstellung



Tabelle 24: Filterung mit Faro Scene, Eiche unbelaubt, niedrige Scaneinstellung, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

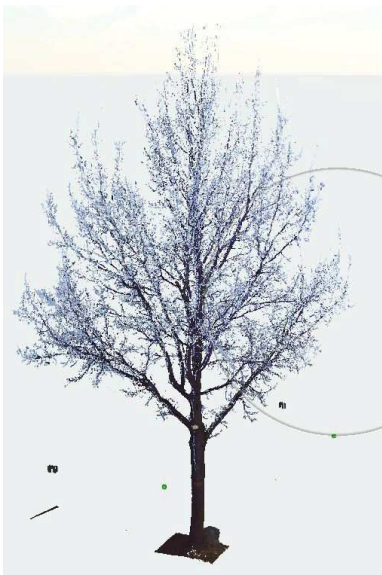
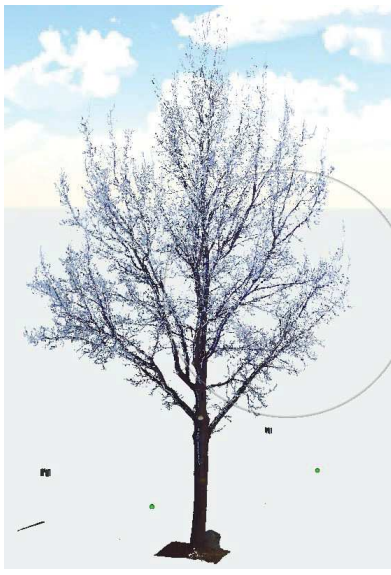
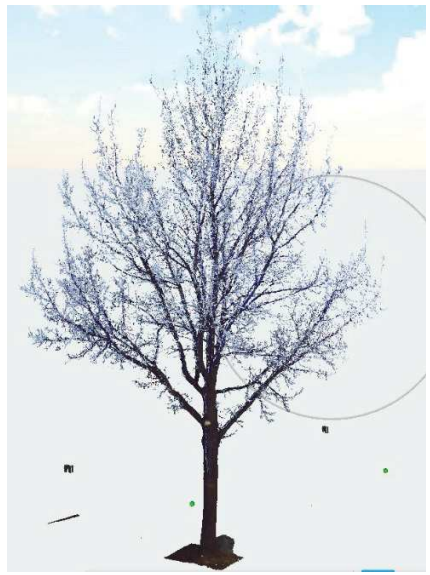


| Ausgangspunktwolke  | 1. Filtrervorgang  | 2. Filtrervorgang  |
|---|--|--|
|  |                     |                        |
| Punktzahl: 2.925.801<br><br>Dateigröße: 47,8 MB (.pod)                            | Punktzahl: 1.597.006<br>Verringerung um ~45,42 %<br>Filterzeit: 16 min<br>Dateigröße: 26,2 MB (.pod) | Punktzahl: 996.650<br>Verringerung um ~37,59 %<br>Filterzeit: 14min 44 sek<br>Dateigröße: 16,4 MB (.pod) |

Tabelle 25: Filterung mit Faro Scene, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

| Ausgangspunktwolke  | 1. Filtrervorgang  | 2. Filtrervorgang  |
|---|--|--|
|  |                     | Abbruch Filtrervorgang nach 3 h 25 min aufgrund mangelnden Fortschrittes |
| Punktzahl: 56.078.907<br><br>Dateigröße: 590 MB (.pod)                              | Punktzahl: 26.286.126<br>Verringerung um 53,13 %<br>Filterzeit: 4 h 2 min<br>Dateigröße: 276 MB (.pod) |  |

### Filterung mit 3D-Reshaper (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0):

Folgende Filtereigenschaften wurden vorab eingestellt:

- Punktwolke filtern: Rauschreduzierung, Intensität: 83 (eine höhere Intensität führt zu erheblichen Punktverlusten und Reduzierungen im Astspitzenbereich)

**Tabelle 26:** Filterung mit 3D-Reshaper, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)







| Ausgangspunktwolke   | 1. Filtervorgang   | 2. Filtervorgang  |
|--|--|---|
|  |                  |               |
| Importdatei: .fls<br>Punktzahl: 2.800.237<br><br>Dateigröße: 43,1 MB (.rsh)        | Punktzahl: 2.054.608<br>Verringerung um 26,63 %<br>Filterzeit: 2 sek<br>Dateigröße: 40,5 MB (.rsh) | Punktzahl: 1.880.406<br>Verringerung um 8,48 %<br>Filterzeit: 1 sek<br>Dateigröße: 32,0 MB (.rsh) |

Tabelle 27: Filterung mit 3D-Reshaper, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)

| Ausgangspunktwolke  | 1. Filtervorgang   | 2. Filtervorgang   |
|---|--|--|
|  |                   |               |
| Punktzahl: 24.000.000<br><br>Dateigröße: 866 MB (.rsh)                            | Punktzahl: 22.808.248<br>Verringerung um 4,97 %<br>Filterzeit: 10 sek<br>Dateigröße: 369 MB (.rsh) | Punktzahl: 22.307.167<br>Verringerung um 2,2 %<br>Filterzeit: 8 sek<br>Dateigröße: 351 MB (.rsh) |

Filterung mit Geomagic Wrap (GEOMAGIC WRAP, Version 2017):

Für einen Import in Geomagic Wrap muss die .fls-Datei zunächst in Faro Scene importiert und anschließend als .wrl-Datei exportiert werden (vgl. Abbildung 51).

Exportzeiten: siehe Tabelle 22.




Folgende Filtereigenschaften wurden vorab eingestellt:

Punkte → Gleichmäßige Reduzierung:




- Zielpunkte um 30 % der Gesamtpunktwolke reduzieren (zweiter Durchgang 70 %)
- Krümmungspriorität max.
- Farbpriorität max.
- Rand behalten: Aus



**Tabelle 28:** *Filterung mit Geomagic Wrap, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (GEOMAGIC WRAP, Version 2017)*

| Ausgangspunktwolke  | 1. Filtervorgang  | 2. Filtervorgang  |
|---|---|---|
|  |                    |                |
| Importdatei: .wrl<br>Punktzahl: 2.925.795<br><br>Dateigröße: 78,1 MB (.wrp)       | Punktzahl: 2.045.689<br>Verringerung um 30,08 %<br>Filterzeit: 39 sek<br>Dateigröße: 78,1 MB (.wrp) | Punktzahl: 881.102<br>Verringerung um 56,93 %<br>Filterzeit: 39 sek<br>Dateigröße: 23,5 MB (.wrp) |

**Tabelle 29:** *Filterung mit Geomagic Wrap, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (GEOMAGIC WRAP, Version 2017)*

| Ausgangspunktwolke  | 1. Filtervorgang   | 2. Filtervorgang  |
|---|--|---|
|  |                         |                      |
| Punktzahl: 56.078.907<br><br>Dateigröße: 1,46 GB (.wrp)                             | Punktzahl: 39.231.652<br>Verringerung um 30,04 %<br>Filterzeit: 18 min 2 sek<br>Dateigröße: 1,46 GB (.wrp) | Punktzahl: 16.844.612<br>Verringerung um 57,06 %<br>Filterzeit: 8 min 31 sek<br>Dateigröße: 449 MB (.wrp) |




Filterung mit CloudCompare (CLOUDCOMPARE Version V2.9beta):

Für einen Import in CloudCompare muss die .fls-Datei zunächst in Faro Scene importiert und anschließend als .e57 oder .pts exportiert werden (vgl. Abbildung 51). Aufgrund der geringeren Dateigröße erfolgt ein Export als .e57 Datei (vgl. Tabelle 22).

Folgende Filtereigenschaften wurden vorab eingestellt:

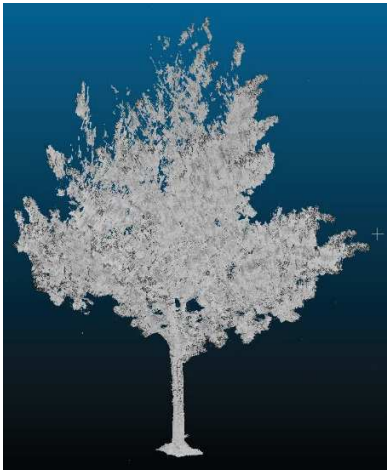
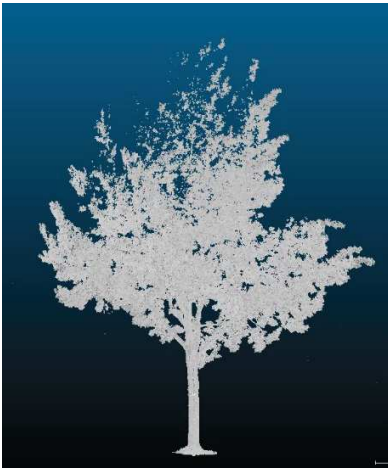
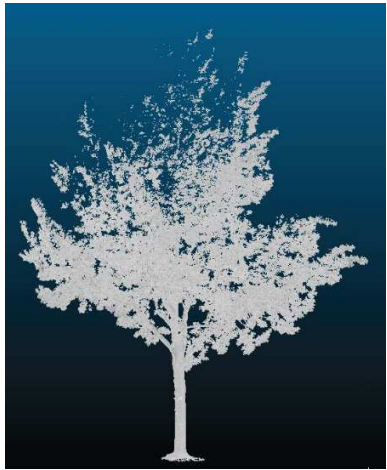
- SOR-Filter: Punktzahl: 6, Standardabweichung: 1
- Rauschfilter: Punkte: 6, max. Fehler-Verhältnis: 1,00, einzelne Punkte entfernen

*Tabelle 30: Filterung mit CloudCompare, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (CLOUDCOMPARE Version V2.9beta)*

| Ausgangspunktwolke   | 1. Filtrvorgang   | 2. Filtrvorgang  |
|--|---|--|
|  |                  |                      |
| Importdatei: .e57<br>Punktzahl: 2.482.743<br><br>Dateigröße: 41,8 MB (.bin)        | Punktzahl: 1.907.336<br>Verringerung um 23,18 %<br>Filterzeit: 31 sek<br>Dateigröße: 23,0 MB (.bin) | Punktzahl: 1.233.679<br>Verringerung um 35,32 %<br>Filterzeit: 1 min 2 sek<br>Dateigröße: 2,93 MB (.bin) |



*Tabelle 31: Filterung mit CloudCompare, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (CLOUDCOMPARE Version V2.9beta)*

| Ausgangspunktwolke  | 1. Filtrivorgang   | 2. Filtrivorgang   |
|---|--|--|
|  |                           |                         |
| Punktzahl: 56.078.907<br><br>Dateigröße: 999 MB (.bin)                            | Punktzahl: 32.239.889<br>Verringerung um 42,51 %<br>Filterzeit: 33 min 21 sek<br>Dateigröße: 584 MB (.bin) | Punktzahl: 18.568.413<br>Verringerung um 42,41 %<br>Filterzeit: 26 min 35 sek<br>Dateigröße: 336 MB (.bin) |




### Filterung mit VRMesh Studio (VRMESH STUDIO, Version 9.4.0):

Die .fls Datei wird zunächst in Faro Scene importiert und anschließend als .pts-Datei exportiert (vgl. Abbildung 51).



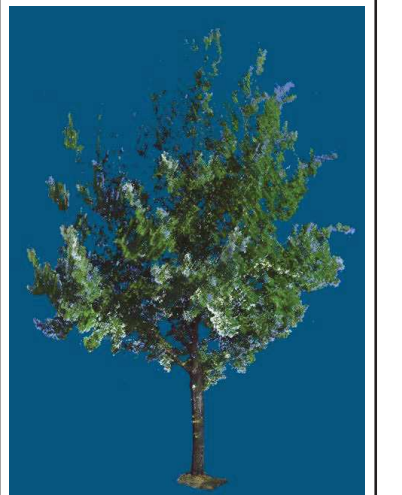
Folgende Filtereigenschaften wurden vorab eingestellt:

- Punktwolke → Reduziere Punktwolke, Prozentsatz: 60%, Krümmung: 0,25

*Tabelle 32: Filterung mit VRMesh Studio, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (VRMESH STUDIO, Version 9.4.0)*

| Ausgangspunktwolke  | 1. Filtrvorgang   | 2. Filtrvorgang   |
|---|---|---|
|  |   |  |
| Importdatei: .pts<br>Punktzahl: 2.800.237<br><br>Dateigröße: -                    | Punktzahl: 1.679.962<br>Verringerung um 40 %<br>Filterzeit: 30 sek<br>Dateigröße: - | Punktzahl: 1.007.886<br>Verringerung um 40 %<br>Filterzeit: 20 sek<br>Dateigröße: - |

*Tabelle 33: Filterung mit VRMesh Studio, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (VRMESH STUDIO, Version 9.4.0)*

| Ausgangspunktwolke  | 1. Filtrvorgang   | 2. Filtrvorgang  |
|---|---|--|
|  |         |       |
| Punktzahl: 56.079.443<br><br>Dateigröße: -  | Punktzahl: 33.644.381<br>Verringerung um 40 %<br>Filterzeit: 12 min 32 sek<br>Dateigröße: - | Punktzahl: 20.183.818<br>Verringerung um 40 %<br>Filterzeit: 6 min 24 sek<br>Dateigröße: - |

Die Dateigröße kann aufgrund einer Sperrung der Speicherfunktion in der Demoversion nicht ermittelt werden.

### Filterung mit Trimble RealWorks (TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3):

Wie bereits in 7.2 dargestellt, dauert ein .fls-Direktimport in Trimble RealWorks zu lange.

Deswegen wird auch hier die .fls-Datei zunächst in Faro Scene importiert und anschließend als .pts exportiert (vgl. Abb.6).

Folgende Filtereigenschaften wurden vorab eingestellt:



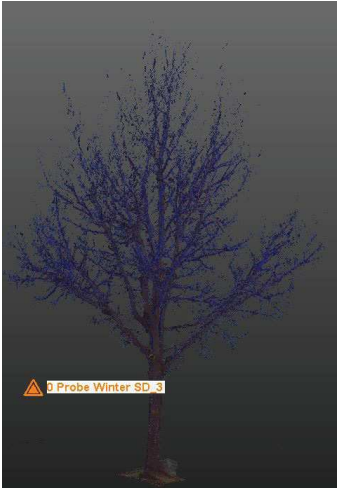
Erste Filterung:

- spital sampling: 3 mm
- intensity sampling: 10-180

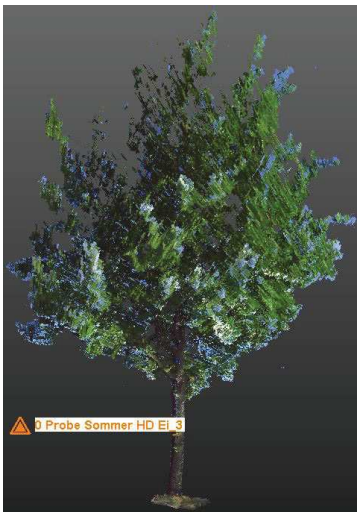


Zweite Filterung:

- spital sampling: 4 mm
- intensity sampling: 20-80

*Tabelle 34: Filterung mit Trimble RealWorks, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3)*

| Ausgangspunktwolke  | 1. Filtrvorgang  | 2. Filtrvorgang  |
|---|--|--|
|  |                 |             |
| Importdatei: .pts<br>Punktzahl: 2.925.801<br>Dateigröße: 429 MB (.rwp)              | Punktzahl: 2.103.177<br>Verringerung um 28,12 %<br>Filterzeit: 12 sek<br>Dateigröße: 429 MB (.rwp) | Punktzahl: 753.403<br>Verringerung um 64,18 %<br>Filterzeit: 14 sek<br>Dateigröße: 429 MB (.rwp) |

**Tabelle 35:** *Filterung mit Trimble RealWorks, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3)*

| Ausgangspunktwolke  | 3. Filtervorgang  | 4. Filtervorgang  |
|---|---|---|
|  |                          |                   |
| Punktzahl: 56.078.907<br><br>Dateigröße: 2,16 GB (.rwp)                           | Punktzahl: 10.642.883<br>Verringerung um 81,02 %<br>Filterzeit: 5 min 1 sek<br>Dateigröße: 2,16 GB (.rwp) | Punktzahl: 6.328.032<br>Verringerung um 40,54 %<br>Filterzeit: 58 sek<br>Dateigröße: 2,16 GB (.rwp) |

Bei Trimble RealWorks werden die einzelnen Filtervorgänge als Projektdatei abgespeichert. Deswegen ist hier nur die Gesamtgröße ersichtlich. Einzelne Filtervorgänge sind somit nicht separat erfassbar.



#### Filterung mit Leica Cyclone:

Gemäß Information von Herrn Saeger, HDS Verkaufsingenieur von Leica Geosystems GmbH Vertrieb, besitzt Leica Cyclone keine funktionellen Vorteile gegenüber dem 3DReshaper, um eine Punktwolke zu bereinigen. Gleiches gilt für den unten folgenden Vermaschungsprozess (siehe detaillierte Programmuntersuchung im Anhang, 2.7 Leica Cyclone, S. 63ff.).

#### Filterung mit Z&F LaserControl (Z+F LASERCONTROL®, Version 8.9.1.21205):

Für einen Import in Z&F LaserControl muss die .fls-Datei zunächst in Faro Scene importiert und anschließend als .e57, .pts oder .wrl exportiert werden (vgl. Abbildung 51). Eine Filterung in Lasercontrol kann jedoch nicht durchgeführt werden, da der Zugriff auf die Filterfunktionen in der Testversion gesperrt ist.

Die nachfolgenden Tabellen fassen die Filterergebnisse der einzelnen Programme zusammen, stellen sie gegenüber und erläutern die Auswirkungen der Filtervorgänge auf die Punktwolke, Filterzeit und Dateireduzierung.



Tabelle 36: Gegenüberstellung Filterfunktionen mit Bewertung, niedrige Scaneinstellung, Eiche unbelaubt

| Eiche unbelaubt, niedrige Scaneinstellung, 1/4 Auflösung, 3xQualität: |              |              |                |               |              |                |               |                     |   |
|---|--------------|--------------|----------------|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------------|---|
| Programm  | 1. Filterung |              |                | 2. Filterung  |              |                | Gesamt-zeit   | Gesamt-redu-zierung | Bewertung   |
|   | Zeit         | Redu-zierung | Datei-größe    | Zeit          | Redu-zierung | Datei-größe    |               |                     |   |
| Faro Scene  | 16 min       | 45,42 %      | 26,2 MB (.pod) | 14 min 44 sek | 37,59%       | 16,4 MB (.pod) | 30 min 44 sek | 65,94%              | lange Filterzeit, hohe Punktreduzierung → Reduzierung der Punkte nur im Detailbereich erkennbar, verhältnismäßige Dateireduzierung, sehr gute Ergebniserzielung, keine gravierenden Punktverluste im Bereich der Astspitzen |
| 3D-Reshaper   | 2 sek        | 26,63 %      | 40,5 MB (.rsh) | 1 sek         | 8,48 %       | 32,0 MB (.rsh) | 3 sek         | 32,85 %             | sehr schnelle Filterzeit, mittlere Punktreduzierung mit sichtbaren Ergebnissen, bereits nach erster Filterung Verluste im Astspitzenbereich erkennbar, keine bis geringe Dateireduzierung                                   |
| Geomagic Wrap   | 39 sek       | 30,08 %      | 78,1 MB (.wrp) | 39 sek        | 56,93 %      | 23,5 MB (.wrp) | 1 min 18 sek  | 69,89 %             | schnelle Filterzeit, sehr hohe Punktreduzierung, Punktreduzierung im Darstellungsprogramm nicht ersichtlich, hohe Dateireduzierung nur nach 2. Filterung  |

Tabelle 37: Fortsetzung Gegenüberstellung Filterfunktionen mit Bewertung, niedrige Scaneinstellung, Eiche unbelaubt

| Eiche unbelaubt, niedrige Scaneinstellung, 1/4 Auflösung, 3xQualität: |              |                  |                   |                 |                  |                   |                 |                             |   |
|---|--------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------------------|---|
| Programm  | 1. Filterung |                  |                   | 2. Filterung    |                  |                   |                 |                             |   |
|   | Zeit         | Redu-<br>zierung | Datei-<br>größe   | Zeit            | Redu-<br>zierung | Datei-<br>größe   | Gesamt-<br>zeit | Gesamt-<br>redu-<br>zierung | Bewertung   |
| Cloud<br>Compare  | 31 sek       | 23,18 %          | 23,0 MB<br>(.bin) | 1 min<br>02 sek | 35,32 %          | 2,93 MB<br>(.bin) | 1 min<br>33 sek | 50,31 %                     | schnelle Filterzeit, mittlere Punkt-<br>reduzierung, die optisch ersichtlich wird,<br>sehr hohe Dateireduzierung, insbesondere<br>nach 2. Filterung, erste Verluste im<br>Astspitzenbereich jedoch bereits nach 1.<br>Filterung ersichtlich |
| VRMesh<br>Studio  | 30 sek       | 40 %             | -                 | 20 sek          | 40 %             | -                 | 50 sek          | 64,01 %                     | schnelle Filterzeit, mittlere bis hohe<br>Punktreduzierung, Punktreduzierung im<br>Darstellungsprogramm kaum ersichtlich  |
| Trimble<br>Realworks  | 12 sek       | 28,12 %          | 429 MB<br>(.rwp)  | 14 sek          | 64,18 %          | 429 MB<br>(.rwp)  | 26 sek          | 74,25 %                     | sehr schnelle Filterung, sehr hohe<br>Punktreduzierung im 2. Filtervorgang →<br>Filterung zu aggressiv, komplette Astspitzen<br>verschwinden und Farbwerte werden<br>verändert,   |

Tabelle 38: Gegenüberstellung Filterfunktionen mit Bewertung, mittlere Scaneinstellung, Eiche belaubt

| Eiche, belaubt, mittlere Scaneinstellung, 1/2 Auflösung, 3xQualität: |                  |              |                   |                 |              |                  |                  |                     |   |
|--|------------------|--------------|-------------------|-----------------|--------------|------------------|------------------|---------------------|---|
| Programm   | 1. Filterung     |              |                   | 2. Filterung    |              |                  | Gesamt-zeit      | Gesamt-redu-zierung | Bewertung   |
|  | Zeit             | Redu-zierung | Datei-größe       | Zeit            | Redu-zierung | Datei-größe      |                  |                     |   |
| Faro Scene   | 4 h<br>02 min    | 53,13 %      | 276 MB<br>(.pod)  | -               | -            | -                | 4 h<br>02 min    | 53,13 %             | sehr lange Filterzeit, sehr hohe Punktreduzierung → aggressive Filterung mit Verlusten des Kronenvolumens, verhältnismäßige Dateireduzierung, Filterabbruch bei 2. Filterung aufgrund langer Ladezeit |
| 3D-Reshaper  | 10 sek           | 4,97 %       | 369 MB<br>(.rsh)  | 8 sek           | 2,2 %        | 351 MB<br>(.rsh) | 18 sek           | 7,05 %              | sehr schnelle Filterung, Punktreduzierung sehr schwach und kaum ersichtlich, verhältnismäßige Datenreduzierung  |
| Geomagic Wrap  | 18 min<br>02 sek | 30,04 %      | 1,46 GB<br>(.wrp) | 8 min<br>31 sek | 57,06 %      | 449 MB<br>(.wrp) | 26 min<br>33 sek | 69,96 %             | mittlere Filterzeit, hohe Punktreduzierung, Punktreduzierung im Darstellungsprogramm nicht ersichtlich  |

Tabelle 39: Fortsetzung Gegenüberstellung Filterfunktionen mit Bewertung, mittlere Scaneinstellung, Eiche belaubt

| Eiche, belaubt, mittlere Scaneinstellung, 1/2 Auflösung, 3xQualität: |                  |              |                   |                  |              |                   |                  |                     |   |
|--|------------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|-------------------|------------------|---------------------|---|
| Programm   | 1. Filterung     |              |                   | 2. Filterung     |              |                   | Gesamt-zeit      | Gesamt-redu-zierung | Bewertung   |
|  | Zeit             | Redu-zierung | Datei-größe       | Zeit             | Redu-zierung | Datei-größe       |                  |                     |   |
| Cloud Compare  | 33 min<br>21 sek | 42,51 %      | 584 MB<br>(.bin)  | 26 min<br>35 sek | 42,41 %      | 336 MB<br>(.bin)  | 59 min<br>56 sek | 66,89 %             | hohe Filterzeit, hohe Punktreduzierung wird ersichtlich, jedoch mit Verlusten des Kronenvolumens bereits nach 1. Filtervorgang, verhältnismäßige Datenreduzierung, keine Übertragung von Farbwerten |
| VRMesh Studio  | 12 min<br>32 sek | 40 %         | -                 | 6 min<br>24 sek  | 40 %         | -                 | 18 min<br>56 sek | 64,01 %             | mittlere Filterzeit, mittlere bis hohe Punktreduzierung, Punktreduzierung im Darstellungsprogramm mit Reduzierung des Kronenvolumens ersichtlich  |
| Trimble Realworks  | 5 min<br>01 sek  | 81,02 %      | 2,16 GB<br>(.rwp) | 58 sek           | 40,54 %      | 2,16 GB<br>(.rwp) | 5 min<br>59 sek  | 88,72 %             | schnelle Filterzeit, sehr hohe Punktreduzierung, Ergebnis der Filterung in Punktwolke kaum ersichtlich  |

Ziel des Filtervorgangs ist es, fehlerhafte Messpunkt (Messrauschfehler) infolge von atmosphärischen- und instrumentbedingten Fehlern (vgl. Unterkapitel 4.1.2) zu entfernen. Hierdurch soll zum einen die Punktzahl und die damit zusammenhängende Dateigröße auf das wesentliche reduziert und zum anderen die Detailgenauigkeit erhöht werden, ohne relevante Messpunkte zu löschen. Die Filterzeit spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, wird jedoch der Detailgenauigkeit als wichtiger Faktor für die menschliche Wahrnehmung untergeordnet.

Wie bereits in Unterkapitel 7.2 festgestellt, liefert Faro Scene das beste Ergebnis bei der reinen Darstellung der ungefilterten Punktwolke im unbelaubten Zustand. Dementsprechend werden bei einer derart fortgeschrittenen detailgetreuen Darstellung höhere Anforderungen an den Filteralgorithmus gestellt, da eine Trennung zwischen echten Messpunkten und Messpunkten infolge von Messrauschen aufgrund eines abnehmenden Punktabstandes immer schwieriger wird. Aus diesem Grund ist der Filterfortschritt bei Faro auch nur im Detailbereich erkennbar. Das Ergebnis ist selbst nach dem zweiten Filtervorgang noch so präzise, dass keine Verluste im Astspitzenbereich entstehen. Demgegenüber steht eine im Verhältnis zu den anderen Programmen längere Filterzeit, die jedoch eine deutliche Datenreduzierung mit sich bringt. Die Gesamtpunktreduzierung liegt mit 65,94 % im oberen Drittel (vgl. Tabelle 36 und Tabelle 37).

Aufgrund einer geringen Gesamtpunktreduzierung verbunden mit einer schnellen Filterzeit und mit bereits ersten Verlusten im Astspitzenbereich nach der ersten Filterung ist die Trennung zwischen realen Messpunkten und Messrauschfehlern in 3D-Reshaper sehr unpräzise. Somit ist die Filterung für Baummodelle hier nicht zielführend. Ähnliches gilt für CloudCompare und Trimble RealWorks. Auch hier vollzieht sich der Filtervorgang in kürzester Zeit. Zudem ist bei Trimble RealWorks zu berücksichtigen, dass im zweiten Filtervorgang durch eine deutlich höhere Punktreduzierung nicht nur Astspitzen, sondern auch Farbwerte gelöscht werden. Die Programme VRMesh Studio und Geomagic Wrap weisen eine schnelle Filterzeit und sehr hohe Punktreduzierungen auf. Jedoch sind hier keine Veränderungen im Bereich der Messrauschreduzierung nach den jeweiligen Filtervorgängen ersichtlich. Weiterhin ist bei beiden Programmen die Benutzerfreundlichkeit aufgrund von komplexen Bedienoberflächen als niedrig einzustufen und die von VRMesh Studio bereitgestellte Demoversion ist in der Benutzung deutlich eingeschränkt (vgl. Tabelle 20). Deswegen werden auch diese Programme für eine zielgerichtete Filterung von Baummodellen ausgeschlossen.



Zusammenfassend eignet sich Faro Scene aufgrund der hohen Detailgenauigkeit am besten für die Filterung von Baummodellen im unbelaubten Zustand. Der einzige Nachteil, die längere Filterzeit, ist durch eine ersparte Zeitaufwendung für zusätzliche Exporte zur Verwendung in anderen Programmen zu relativieren. Verbunden mit der höheren Scaneinstellung ergeben sich für den belaubten Zustand grundsätzliche höhere Filterzeiten und Dateigrößen. Hier werden durch die einzelnen Filtervorgänge bei keinem Programm nennenswerte positive Verbesserungen hervorgerufen. Zumeist sind Veränderungen gar nicht erkennbar und wenn, nur durch teils erhebliche Verluste im Kronenvolumen (z.B. bei Faro Scene und CloudCompare). Tendenziell ist die Gesamtpunktreduzierung identisch zu den Filterergebnissen des unbelaubten Zustandes. Lediglich bei 3D-Reshaper wird eine noch geringere Punktreduzierung erreicht (7,05 %, vgl. Tabelle 38). Aus diesem Grund ist eine Filterung der belaubten Baumaufnahme in keiner Weise zielführend. Dennoch werden die Filterergebnisse im Folgenden zur Vermaschung weiterverwendet um zu überprüfen, ob die Filterung Auswirkungen auf die Vermaschung hat.

Im nächsten Schritt werden nun die Vermaschungsfunktionen der einzelnen Programme getestet. Auch hier werden im Rahmen der Voruntersuchungen wieder die 3 Probeaufnahmen weiterverarbeitet. Die für die Vermaschung verwendeten Einstellungen wurden wieder vorab durch mehrere Testdurchläufe als Optimum festgelegt. Ergebnisse aus den zuvor gewonnenen Filtervorgängen werden ebenfalls genutzt.

#### Vermaschung mit Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30):

Folgende Vermaschungseigenschaften wurden vorab eingestellt:

- non watering: 50
- Glätten: 3
- Max. Dreiecke auf 1.000.000

Tabelle 40: Vermaschung mit Faro Scene, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)



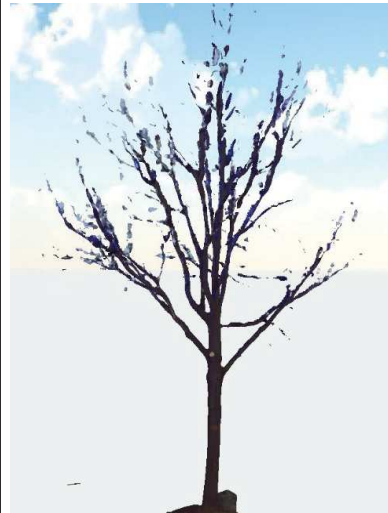


| Ungefilterte Punktwolke   | 1x gefilterte Punktwolke  | 2x gefilterte Punktwolke  |
|---|---|---|
|                  |  |  |
| Importdatei: .fls<br>Anzahl Dreiecke: 999.998<br>Zeit: 2 min 17 sek<br>Dateigröße: 50,6 MB (.obj) | Anzahl Dreiecke: 1.000.000<br>Zeit: 3 min 16 sek<br>Dateigröße: 50,6 MB (.obj)    | Anzahl Dreiecke: 395.029<br>Zeit: 41 sek<br>Dateigröße: 19,2 MB (.obj)              |

Tabelle 41: Vermaschung mit Faro Scene, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

| Ungefilterte Punktwolke   | 1x gefilterte Punktwolke   | 2x gefilterte Punktwolke   |
|---|--|--|
|  |  | Filtervorgangsabbruch<br>nach 3 h 25 min auf-<br>grund keines Fortschrit-<br>tes |
| Anzahl Dreiecke: 999.999<br>Zeit: 14 min 06 sek<br>Dateigröße: 48,5 MB (.obj)       | Anzahl Dreiecke: 1.000.000<br>Zeit: 6 min 05 sek<br>Dateigröße: 49,3 MB (.obj)       |  |

#### Vermaschung mit 3D-Reshaper (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0):

Folgende Vermaschungseigenschaften wurden vorab eingestellt:

- regelmäßiges Abtasten, mittlerer Abstand zwischen den Punkten: 0,0087 (variiert)
- Erkennen von Löchern
- Größe des Dreiecks: 0,024
- Ignoriere die Scanrichtung: Deaktiviert
- Vermaschung verfeinert, ohne Punktwolke
- Winkel zwischen Flächen für scharfe Kanten: 10
- Anzahl an Dreiecken: 1.000.000
- Glätten → Normale Glättung, Rauschen glätten, Stärke der Glättung: 14
- freie Kanten Glätten

*Tabelle 42: Vermaschung mit 3D-Reshaper, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)*

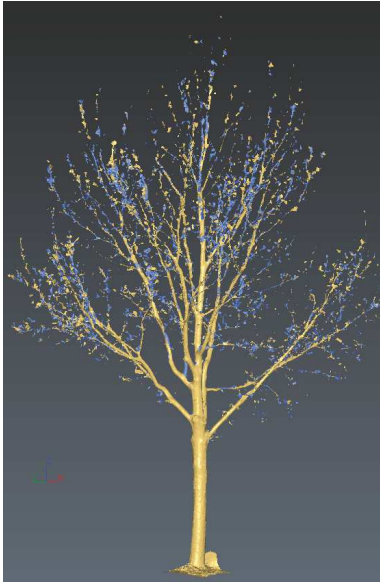
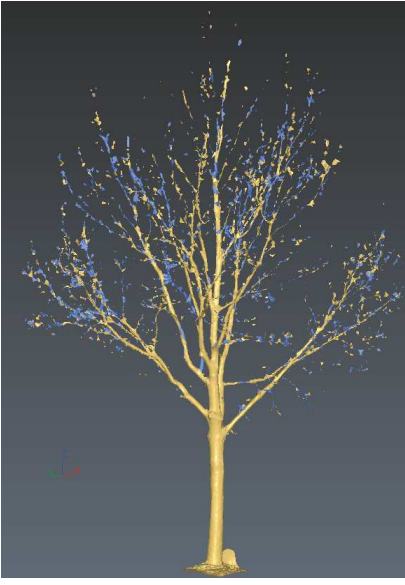
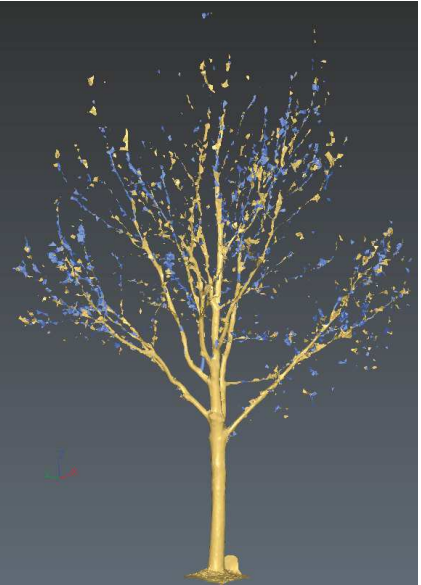
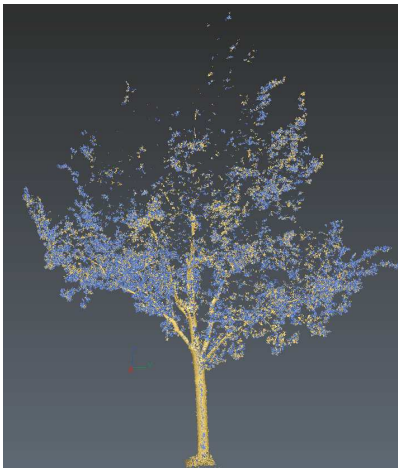

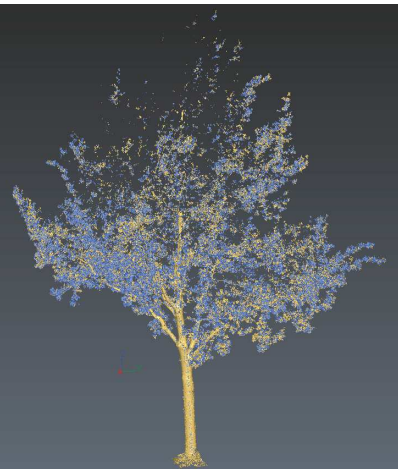
| Ungefilterte Punktwolke   | 1x gefilterte Punktwolke   | 2x gefilterte Punktwolke  |
|---|--|---|
|           |  |  |
| Importdatei: .fls<br>Anzahl Dreiecke: 171.088<br>Zeit: 16 sek<br>Dateigröße: 8,97 MB (.obj) | Anzahl Dreiecke: 89.752<br>Zeit: 6 sek<br>Dateigröße: 4,67 MB (.obj)               | Anzahl Dreiecke: 57.239<br>Zeit: 4 sek<br>Dateigröße: 2,97 MB (.obj)                |

Tabelle 43: Vermaschung mit 3D-Reshaper, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)

| Ungefilterte Punktwolke   | 1x gefilterte Punktwolke  | 2x gefilterte Punktwolke  |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Anzahl Dreiecke: 1.983.975<br>Zeit: 3 min 10 sek<br>Dateigröße: 110,0 MB (.obj)   | Anzahl Dreiecke: 2.538.289<br>Zeit: 2 min 55 sek<br>Dateigröße: 142,0 MB (.obj)   | Anzahl Dreiecke: 2.611.217<br>Zeit: 2 min 36 sek<br>Dateigröße: 147,0 MB (.obj)     |

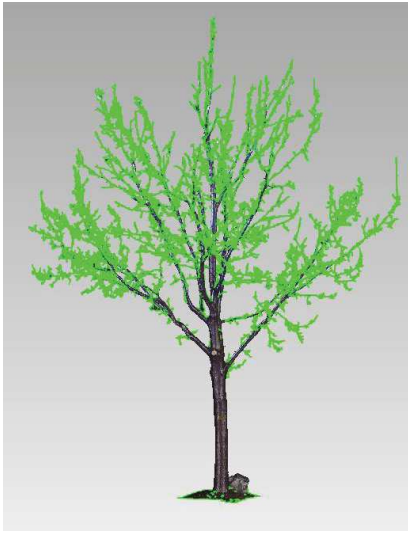


### Vermaschung mit Geomagic Wrap (GEOMAGIC WRAP, Version 2017):

Folgende Vermaschungseigenschaften wurden vorab eingestellt:

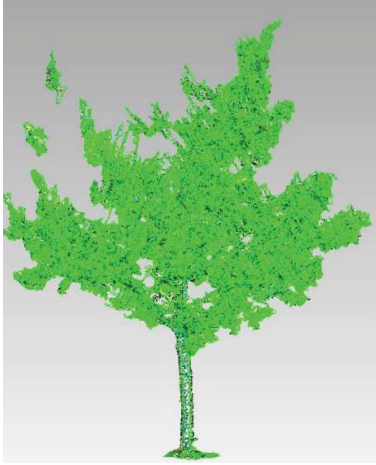
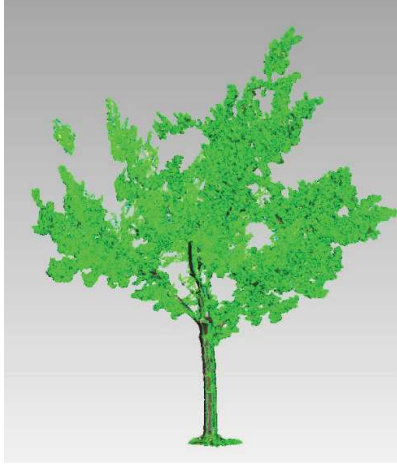

- Funktion: Punktwrappen / vereinigen:
- Rauschen verringern
- lokales Rauschen verringern
- max. Punktabstand: 0,06 mm
- max. Dreiecke: 10.000.000



**Tabelle 44:** Vermaschung mit Geomagic Wrap, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (GEOMAGIC WRAP, Version 2017)

| Ungefilterte Punktwolke   | 1x gefilterte Punktwolke  | 2x gefilterte Punktwolke  |
|---|---|---|
|                    |  |  |
| Importdatei: .wrl<br>Anzahl Dreiecke: 2.268.250<br>Zeit: 3 min 9 sek<br>Dateigröße: 255,0 MB (.obj) | Anzahl Dreiecke: 1.901.817<br>Zeit: 2 min 13 sek<br>Dateigröße: 211,0 MB (.obj)   | Anzahl Dreiecke: 1.007.879<br>Zeit: 1 min 02 sek<br>Dateigröße: 117,0 MB (.obj)     |

**Tabelle 45:** Vermaschung mit Geomagic Wrap, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (GEOMAGIC WRAP, Version 2017)

| Ungefilterte Punktwolke   | 1x gefilterte Punktwolke  | 2x gefilterte Punktwolke   |
|---|---|--|
|  |  |  |
| Anzahl Dreiecke: 683.596<br>Zeit: 55 min 40 sek<br>Dateigröße: 115,0 MB (.obj)      | Anzahl Dreiecke: 22.055.605<br>Zeit: 46 min 35 sek<br>Dateigröße: 2,38 GB (.obj)    | Anzahl Dreiecke: 12.310.588<br>Zeit: 20 min 40 sek<br>Dateigröße: 1,41 GB (.obj)     |


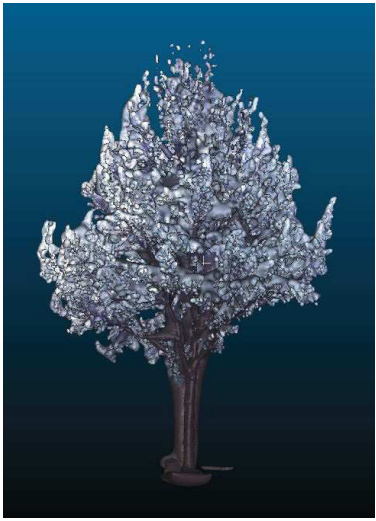



Vermaschung mit CloudCompare (CLOUDCOMPARE Version V2.9beta):

Folgende Vermaschungseigenschaften wurden vorab eingestellt:

- Plugins - PCL wrapper,
- Normalenabschätzung und Krümmungseinstellung: Radiussuche = 0,0852; Krümmung überschreiben
- Plugins -Poisson Oberflächenrekonstruktion – Achterbaumstruktur Tiefe: 10

*Tabelle 46: Vermaschung mit CloudCompare, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (CLOUDCOMPARE Version V2.9beta)*

| Ungefilterte Punktwolke  | 1x gefilterte Punktwolke   | 2x gefilterte Punktwolke  |
|--|--|---|
|                    |  |  |
| Importdatei: .e57<br>Anzahl Dreiecke: 4.195.338<br>Zeit: 4 min 15 sek<br>Dateigröße: 355,0 MB (.obj) | Anzahl Dreiecke: 3.084.708<br>Zeit: 2 min 24 sek<br>Dateigröße: 257 MB (.obj)      | Anzahl Dreiecke: 2.556.158<br>Zeit: 1 min 20 sek<br>Dateigröße: 211,0 MB (.obj)     |

*Tabelle 47: Vermaschung mit CloudCompare, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (CLOUDCOMPARE Version V2.9beta)*

| Ungefilterte Punktwolke                                    | 1x gefilterte Punktwolke                                   | 2x gefilterte Punktwolke                                   |
|--|--|--|
| PCL vor Vermaschung nach 3 Stunden Ladezeit fehlgeschlagen | PCL vor Vermaschung nach 3 Stunden Ladezeit fehlgeschlagen | PCL vor Vermaschung nach 3 Stunden Ladezeit fehlgeschlagen |



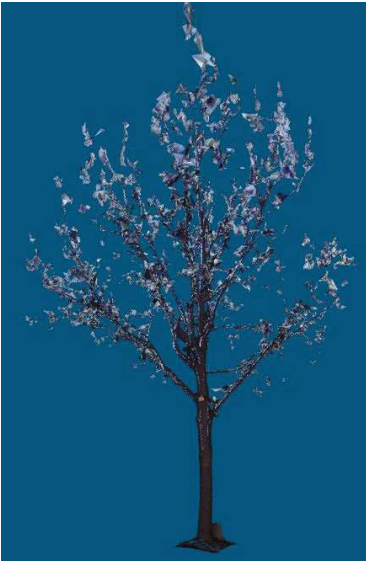
Vermaschung mit VRMesh Studio (VRMESH STUDIO, Version 9.4.0):

Folgende Vermaschungseigenschaften wurden vorab eingestellt:




- Funktion Punktwolke – Punktwolke zu vermaschtem Objekt
- Punkte aus der Geländekontur: Deaktivierung

### 7.3 Wahl der Softwarelösung zur weiteren Bearbeitung von Punktwolken

**Tabelle 48: Vermaschung mit VRMesh Studio, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (VRMesh Studio, Version 9.4.0)**

| Ungefilterte Punktwolke  | 1x gefilterte Punktwolke   | 2x gefilterte Punktwolke  |
|--|--|---|
|       |  |  |
| Importdatei: .pts<br>Anzahl Dreiecke: 2.780.857<br>Zeit: 2 min 48 sek<br>Dateigröße: - | Anzahl Dreiecke: 1.477.380<br>Zeit: 33 sek<br>Dateigröße: -                        | Anzahl Dreiecke: 746.048<br>Zeit: 36 sek<br>Dateigröße: -                           |

**Tabelle 49: Vermaschung mit VRMesh Studio, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (VRMesh Studio, Version 9.4.0)**

| Ungefilterte Punktwolke  | 1x gefilterte Punktwolke   | 2x gefilterte Punktwolke  |
|--|--|---|
|       |  |  |
| Importdatei: .pts<br>Anzahl Dreiecke: 53.600.860<br>Zeit: 57 min 05 sek<br>Dateigröße: - | Anzahl Dreiecke: 24.134.234<br>Zeit: 18 min 52 sek<br>Dateigröße: -                  | Anzahl Dreiecke: 12.834.359<br>Zeit: 13 min 25 sek<br>Dateigröße: -                   |

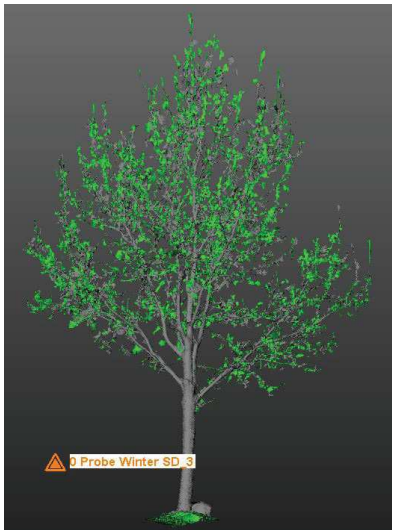
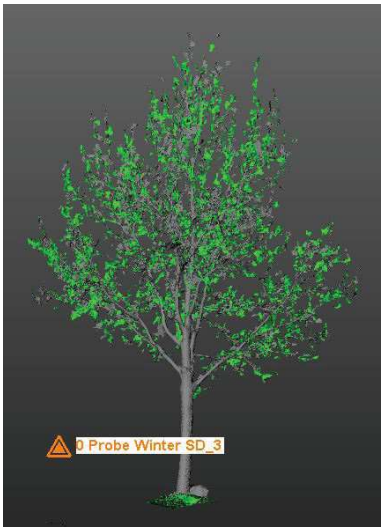
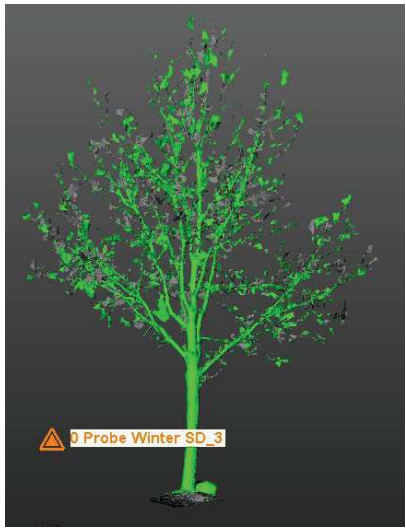
Die Dateigröße kann aufgrund einer Sperrung der Speicherfunktion in der Demoversion nicht ermittelt werden.

### Vermaschung mit Trimble RealWorks (TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3):

Folgende Vermaschungseigenschaften wurden vorab eingestellt:

- keine Projektion
- Anzeigepunkte
- ungleichmäßige Punkte entfernen

*Tabelle 50: Vermaschung mit Trimble RealWorks, Eiche unbelaubt, niedrige Qualität, 1/4 Auflösung, 3x Qualität (TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3)*

| Ungefilterte Punktwolke  | 1x gefilterte Punktwolke   | 2x gefilterte Punktwolke  |
|--|--|---|
|                    |  |  |
| Importdatei: .pts<br>Anzahl Dreiecke: 4.173.801<br>Zeit: 3 min 39 sek<br>Dateigröße: 352,0 MB (.obj) | Anzahl Dreiecke: 2.771.916<br>Zeit: 2 min 23 sek<br>Dateigröße: 229,0 MB (.obj)    | Anzahl Dreiecke: 1.363.252<br>Zeit: 59 sek<br>Dateigröße: 109,0 MB (.obj)           |

### 7.3 Wahl der Softwarelösung zur weiteren Bearbeitung von Punktwolken

Tabelle 51: Vermaschung mit Trimble RealWorks, Eiche belaubt, mittlere Qualität, 1/2 Auflösung, 3x Qualität (TRIMBLE REALWORKS, Version 10.3)

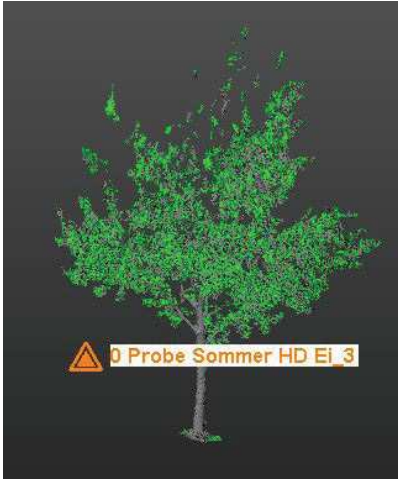
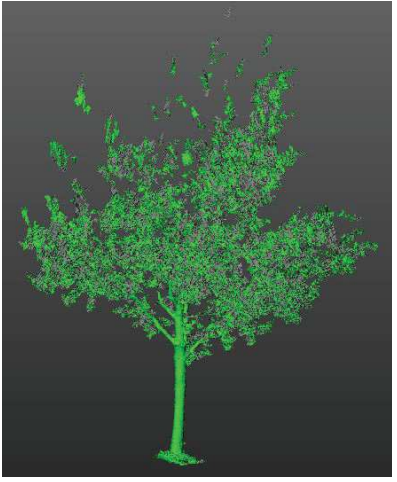
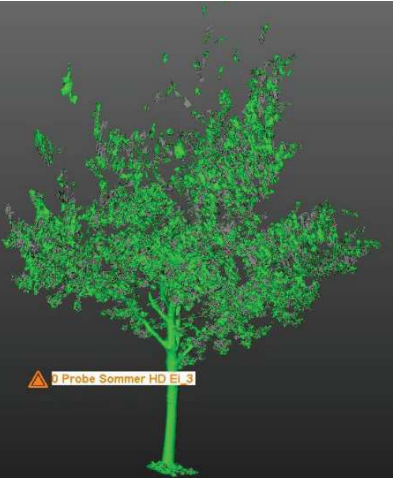
| Ungefilterte Punktwolke  | 1x gefilterte Punktwolke  | 2x gefilterte Punktwolke  |
|--|---|---|
|                         |  |  |
| Importdatei: .pts<br>Anzahl Dreiecke: 20.668.058<br>Zeit: 1h 45 min 30 sek<br>Dateigröße: 1,79 GB (.obj) | Anzahl Dreiecke: 13.267.501<br>Zeit: 24 min 56 sek<br>Dateigröße: 1,14 GB (.obj)  | Anzahl Dreiecke: 7.141.975<br>Zeit: 7 min 59 sek<br>Dateigröße: 633 MB (.obj)       |



Tabelle 52: Gegenüberstellung Vermaschung mit Bewertung, niedrige Scaneinstellung, Eiche unbelaubt

| Eiche unbelaubt, niedrige Scaneinstellung, 1/4 Auflösung, 3xQualität: |                          |           |                           |                          |           |                           |  |
|---|--------------------------|-----------|---------------------------|--------------------------|-----------|---------------------------|--|
| Programm  | Vermaschung 1. Filterung |           |                           | Vermaschung 2. Filterung |           |                           | Bewertung  |
|   | Zeit                     | Dreiecke  | Datei-<br>größe<br>(.obj) | Zeit                     | Dreiecke  | Datei-<br>größe<br>(.obj) |  |
| Faro<br>Scene   | 3 min<br>16 sek          | 1.000.000 | 50,6 MB                   | 41 sek                   | 395.029   | 19,2 MB                   | lange Vermaschungszeit, mittlere Anzahl an Dreiecken, Erzielung von akzeptablen Dateigrößen, Vermaschung funktioniert, Vermaschung der 2. Filterung nicht realgetreu → Verlust von Feinästen, Farbwerte bleiben erhalten                         |
| 3D-<br>Reshaper   | 6 sek                    | 89.752    | 4,67 MB                   | 4 sek                    | 57.239    | 2,97 MB                   | sehr schnelle Vermaschungszeit, sehr geringe Anzahl an Dreiecken → hohe Dateireduzierung, akzeptable Ergebniserzielung, Farbwert wird heller dargestellt → deutliche Abweichung, hohe Anzahl an nicht geschlossener Dreiecke (blaue Darstellung) |
| Geomagic<br>Wrap  | 3 min<br>09 sek          | 1.901.817 | 211,0 MB                  | 1 min<br>02 sek          | 1.007.879 | 117,0 MB                  | lange Vermaschungszeit, hohe Anzahl an Dreiecken, hohe Dateireduzierung, Übernahme von Farbwerten, hohe Anzahl an nicht geschlossener Dreiecke (grüne Darstellung)   |



Tabelle 53: Fortsetzung Gegenüberstellung Vermaschung mit Bewertung, niedrige Scaneinstellung, Eiche unbelaubt

| Eiche unbelaubt, niedrige Scaneinstellung, 1/4 Auflösung, 3xQualität: |                          |           |                           |                          |           |                           |  |
|---|--------------------------|-----------|---------------------------|--------------------------|-----------|---------------------------|--|
| Programm  | Vermaschung 1. Filterung |           |                           | Vermaschung 2. Filterung |           |                           | Bewertung  |
|   | Zeit                     | Dreiecke  | Datei-<br>größe<br>(.obj) | Zeit                     | Dreiecke  | Datei-<br>größe<br>(.obj) |  |
| Cloud<br>Compare  | 2 min<br>24 sek          | 3.084.708 | 257 MB                    | 1 min<br>20 sek          | 2.556.158 | 211,0 MB                  | lange Vermaschungszeit, hohe Anzahl an Dreiecken, geringe Dateireduzierung, Übernahme von Farbwerten, kein zufriedenstellendes Ergebnis  |
| VRMesh<br>Studio  | 33 sek                   | 1.477.380 | -                         | 36 sek                   | 746.048   | -                         | sehr schnelle Vermaschungszeit, mittlere Anzahl an Dreiecken, Übernahme von Farbwerten, einige Vermaschungsfehler durch Verbindung mehrerer Äste   |
| Trimble<br>Realworks  | 2 min<br>23 sek          | 2.771.916 | 229,0 MB                  | 59 sek                   | 1.363.252 | 109,0 MB                  | lange Vermaschungszeit, hohe Anzahl an Dreiecken, verhältnismäßige Dateireduzierung, Übernahme von Farbwerten → bei der Vermaschung der 2. Filterung jedoch nichtmehr korrekt, hohe Anzahl an nicht geschlossener Dreiecke (grüne Darstellung) |

Tabelle 54: Gegenüberstellung Vermaschung mit Bewertung, mittlere Scaneinstellung, Eiche belaubt

| Eiche, belaubt, mittlere Scaneinstellung, 1/2 Auflösung, 3xQualität: |                          |            |                           |                          |            |                           |  |
|--|--------------------------|------------|---------------------------|--------------------------|------------|---------------------------|--|
| Programm   | Vermaschung 1. Filterung |            |                           | Vermaschung 2. Filterung |            |                           | Bewertung  |
|  | Zeit                     | Dreiecke   | Datei-<br>größe<br>(.obj) | Zeit                     | Dreiecke   | Datei-<br>größe<br>(.obj) |  |
| Faro<br>Scene  | 6 min<br>05 sek          | 1.000.000  | 49,3 MB                   | -                        | -          | -                         | schnelle Vermaschungszeit, sehr geringe Anzahl an Dreiecken, keine Dateireduzierung, Blätter und Äste der Kronenspitze verschwinden bei Vermaschung durch 1. Filterung, Übernahme von Farbwerten   |
| 3D-<br>Reshaper  | 2 min<br>55 sek          | 2.538.289  | 142,0 MB                  | 2 min<br>36 sek          | 2.611.217  | 147,0 MB                  | sehr schnelle Vermaschungszeit, geringe Anzahl an Dreiecke, keine Dateireduzierung, Farbwert wird heller dargestellt, hohe Anzahl an nicht geschlossener Dreiecke (blaue Darstellung)  |
| Geomagic<br>Wrap   | 46 min<br>35 sek         | 22.055.605 | 2,38 GB                   | 20 min<br>40 sek         | 12.310.588 | 1,41 GB                   | sehr lange Vermaschungszeit, sehr hohe Anzahl an Dreiecken, hohe Dateireduzierung, jedoch hohe Dateigröße nach Vermaschung der 1. Filterung, Teile der Kronenspitze werden bei der Vermaschung nicht erfasst, Farbwerte werden nur teilweise übernommen, hohe Anzahl an nicht geschlossener Dreiecke (grüne Darstellung) |

Tabelle 55: Fortsetzung Gegenüberstellung Vermaschung mit Bewertung, mittlere Scaneinstellung, Eiche belaubt

| Eiche, belaubt, mittlere Scaneinstellung, 1/2 Auflösung, 3xQualität: |                          |            |                           |                          |            |                           |  |
|--|--------------------------|------------|---------------------------|--------------------------|------------|---------------------------|--|
| Programm   | Vermaschung 1. Filterung |            |                           | Vermaschung 2. Filterung |            |                           | Bewertung  |
|  | Zeit                     | Dreiecke   | Datei-<br>größe<br>(.obj) | Zeit                     | Dreiecke   | Datei-<br>größe<br>(.obj) |  |
| Cloud Compare  |                          |            |                           |                          |            |                           | Keine Ergebniserzielung  |
| VRMesh Studio  | 18 min<br>52 sek         | 24.134.234 | -                         | 13 min<br>25 sek         | 12.834.359 | -                         | lange Vermaschungszeit, sehr hohe Anzahl an Dreiecken, Teile der Kronenspitze werden bei der Vermaschung nicht erfasst, Übernahme von Farbwerten   |
| Trimble Realworks  | 24 min<br>56 sek         | 13.267.501 | 1,14 GB                   | 7 min<br>59 sek          | 7.141.975  | 633,0 MB                  | lange Vermaschungszeit, mittlere Anzahl an Dreiecken, verhältnismäßige Dateireduzierung, Farbwerte nicht korrekt werden übernommen → hohe Anzahl an nicht geschlossener Dreiecke (grüne Darstellung) |

Ziel der Vermaschung ist es, aus der generierten Punktwolke polygonale Oberflächen zu erzeugen (vgl. Unterkapitel 4.1.3), um geringere Dateigrößen zu erzielen, die spätere Übergabe in Visualisierungsprogramme zu vereinfachen und die Übertragung von Farbwerten zu gewährleisten. Zur Bewertung der erzielten Vermaschungen werden die erzeugte Anzahl an Dreiecken und die Vermaschungszeitdauer berücksichtigt. Zudem spielt die Dateigröße eine wichtige Rolle. Hier wird die vermaschte .obj-Datei verglichen, da dieses Dateiformat als weit verbreitet gilt (BÖHLER ET AL. 2002, S.24) (vgl. Unterkapitel 5.5 und Tabelle 20). Weiterhin spielt die Detailgenauigkeit in Bezug auf die menschliche Wahrnehmung wieder eine übergeordnete Rolle.

Die Gegenüberstellung der Vermaschungsergebnisse des unbelaubten Zustandes (niedrige Scaneinstellung, Tabelle 40 und Tabelle 42 sowie Tabelle 52 und Tabelle 53) zeigt, dass Faro Scene und 3D-Reshaper die akzeptabelsten Ergebnisse erzielen. Hierbei benötigt Faro jedoch eine wesentlich längere Vermaschungszeit und bildet mehr Dreiecke. 3D-Reshaper wiederum weist die schnellste Vermaschungsdauer auf und bildet wenig Dreiecke, was zu einer hohen Dateireduzierung führt. Nachteilig bei 3D-Reshaper sind die nicht korrekte Übernahme der Farbwerte und eine hohe Anzahl an nicht geschlossener Dreiecke, die in einer anderen Farbe dargestellt werden. Die Vermaschung bei Faro Scene ist in sich geschlossen und lässt den ursprünglichen Habitus wiedererkennen, jedoch geraten Details in den Hintergrund und werden durch die Vermaschung überschrieben. Dies führt zu einer leicht verschwommenen Darstellung. Die Vermaschung in 3D-Reshaper ist klarer im Detail zu erkennen. Hier werden jedoch Astspitzen (Feinäste) durch nicht geschlossene Dreiecke nicht detailgetreu erfasst.

CloudCompare kann aufgrund der oben aufgeführten Darstellungen zur Vermaschung ausgeschlossen werden. Wegen der fehlenden Speicherfunktion in der Testversion kann auch VRMesh Studio ausgeschlossen werden (vgl. detaillierte Programmuntersuchung im Anhang, 2.4 VirtualGrid VRMesh Studio, S. 37ff.). Trimble RealWorks und Geomagic Wrap weisen beide eine hohe Vermaschungszeit auf. Weiterhin sind die erzielten Ergebnisse sowohl im Bereich der Astspitzen als auch an den Astansätzen mit noch mehr ungeschlossenen Dreiecken versehen als bei 3D-Reshaper. Deshalb können auch diese Programme für die Vermaschungen der Baummodelle ausgeschlossen werden.

Bei den Vermaschungsergebnissen im belaubten Zustand (mittlere Scaneinstellung) wird bei keinem Programm eine akzeptable Vermaschung erzielt. Aufgrund der höheren Scaneinstellung und der damit verbundenen Punktzahl erhöht sich bei allen Programmen auch die Vermaschungsdauer. Durch die Filterung wird kein verbessertes Ergebnis der Vermaschung erreicht, da Teile der Kronenspitzen im Ergebnis nicht erfasst werden. Somit ist keine detailgetreue Widerspiegelung des Habitus gewährleistet. Eine Vermaschung im belaubten Zustand ist somit nicht zielführend.

Zum Schluss besteht die Option, die positiven Filterergebnisse aus Faro Scene mit der akzeptablen Vermaschung von 3D-Reshaper zu kombinieren. Hierzu wird die mit Faro Scene gefilterte .fls-Datei in 3D-Reshaper importiert und dort vermascht. Die Ergebnisse zeigen die nachfolgenden Tabellen.

Tabelle 56: Darstellung Programmkombination Faro Scene (Filterung) und 3D-Reshaper (Vermaschung), Eiche unbelaubt, niedrige Scaneinstellung (FARO SCENE, Version 6.2.4.30; 3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)

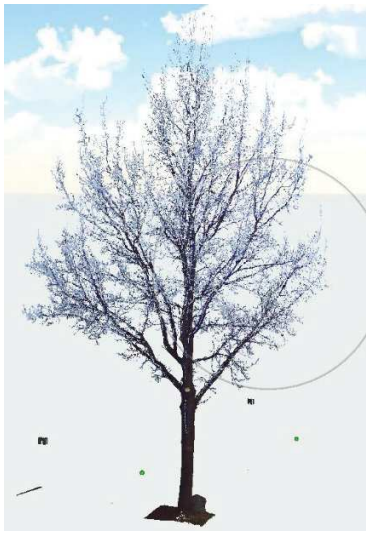

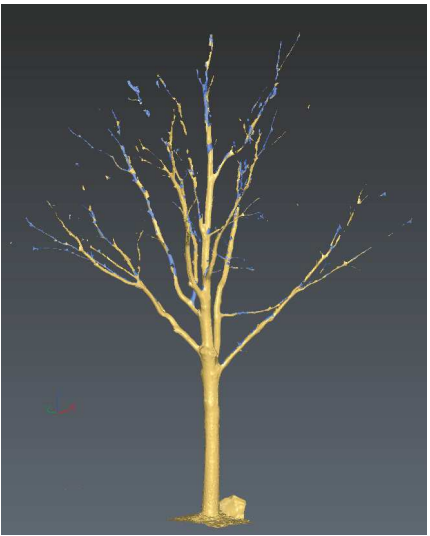
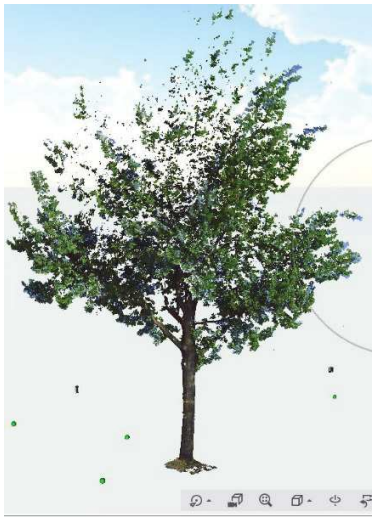

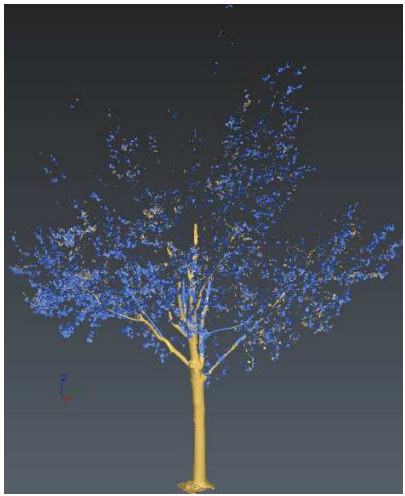
| 1x gefilterte Punktwolke   | Vermaschung Faro   | Vermaschung Geomagic  |
|--|--|---|
|  |  |  |
| Punktzahl: 1.597.006<br>Filterzeit: 16 min   | Anzahl Dreiecke: 1.000.000<br>Zeit: 3 min 16 sek                                   | Anzahl Dreiecke: 85.370<br>Zeit: 4 sek  |
| 2x gefilterte Punktwolke   | Vermaschung Faro   | Vermaschung Geomagic  |



Tabelle 57: Darstellung Programmkombination Faro Scene (Filterung) und 3D-Reshaper (Vermaschung), Eiche belaubt, mittlere Scaneinstellung (FARO SCENE, Version 6.2.4.30; 3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)

| 1x gefilterte Punktwolke  | Vermaschung Faro  | Vermaschung Geomagic  |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Punktzahl: 26.286.126<br>Filterzeit: 4 h 2 min                                    | Anzahl Dreiecke: 999.999<br>Zeit: 6 min 5 sek                                     | Anzahl Dreiecke: 1.493.511<br>Zeit: 3 min 36 sek                                    |

Wie in Tabelle 56 ersichtlich, hat sich die Vermaschung mit 3D-Reshaper auf Basis der mit Faro gefilterten Punktwolke verbessert. Die Anzahl der nicht geschlossenen Dreiecke hat sich gegenüber der vorherigen Vermaschung mit 3D-Reshaper verringert. Im belaubten Zustand (vgl. Tabelle 57) zeigt sich jedoch keine Ergebnisverbesserung.

Schlussfolgernd lässt sich festhalten, dass die Filtervorgänge keinerlei positive Auswirkungen auf das Vermaschungsergebnis haben. Auch die Vermaschung der ungefilterten Punktwolken erreichen kein zufriedenstellendes Ergebnis (vgl. Tabelle 38 bis Tabelle 49). Hier wird bei den belaubten Aufnahmen in allen Varianten die Kronenspitze nicht korrekt von der Vermaschung erfasst. Hauptproblem ist auch hier die Vielzahl nicht geschlossener Dreiecke. Weiterhin lässt sich in keinem Programm eine klare Blattstruktur widerspiegeln. Die Vermaschung von Faro Scene ist im Bereich der Kronendarstellung dem Original am ähnlichsten. Jedoch geraten auch hier Details in den Hintergrund und die Darstellung ist leicht verschwommen. Bei der Vermaschung der ungefilterten unbelaubten Aufnahmen treten innerhalb der einzelnen Programme die gleichen Schwierigkeiten wie bei den gefilterten Ergebnissen auf. Neben der hohen Anzahl an nicht geschlossenen Dreiecken und der Vernachlässigung von Feinästen kommt ein erhöhtes Messrauschen hinzu, welches bei den ungefilterten Punktwolken am stärksten vorhanden ist. Hierunter leidet insbesondere die Detailschärfe und somit der Echtheitsgrad.

Im letzten Schritt erfolgt die Darstellung der Ergebnisse in einem Visualisierungsprogramm. Da eine Vermaschung der generierten Punktwolken nicht zielführend ist, besteht weiterhin die Option, eine reine Punktwolkenvisualisierung durchzuführen (vgl. Unterkapitel 4.1.3). Untersucht wird die Visualisierung in den Programmen Autodesk 3ds Max Design und Maxon Cinema 4D. Die Programme wurden bereits in Unterkapitel 4.2 vorgestellt. Abbildung 52 gibt einen Überblick über Importmöglichkeiten.

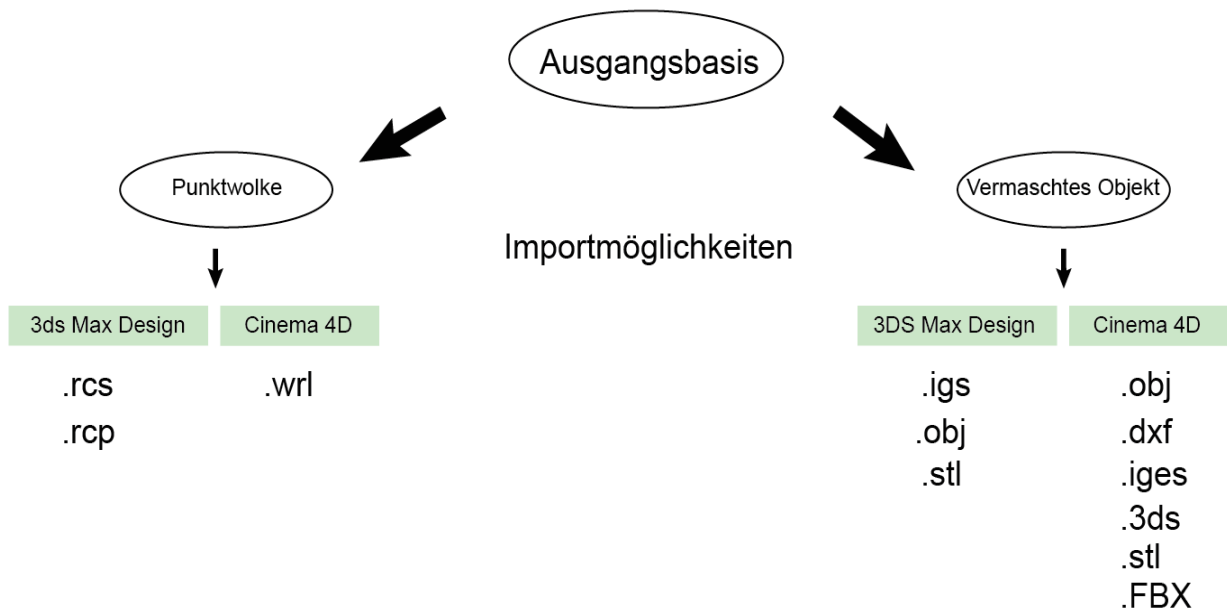


Abbildung 52: Importmöglichkeiten in Visualisierungsprogramme (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; MAXON CINEMA 4D, Version R14)

Bei 3ds Max Design besteht die Möglichkeit eines direkten Hinzufügens von Punktwolkenobjekten als .rcs- oder .rcp-Datei. Hierzu besteht als erstes die Möglichkeit, die .fls-Datei in Faro Scene als .rcp-Datei zu exportieren. Gem. Tabelle 58 fallen folgende Exportzeiten an (vgl. Tabellenauszug aus Tabelle 22):

Tabelle 58: .fls-Export in .rcp-Datei in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

| Scanobjekt   | Ausgangs-Datei | Größe  | Dauer Impo.  | Export-Datei | Dauer Expo.   | Größe  | Dauer Gesamtzeit |
|--|----------------|--------|--------------|--------------|---------------|--------|------------------|
| Eiche, un-belaubt, niedrige Einstellung (ungefiltert)  | .fls           | 645 MB | 1 min 10 sek | .rcp         | 45 min 15 sek | 998 MB | 46 min 25 sek    |
| Eiche, un-belaubt, niedrige Einstellung (1x gefiltert) | .fls           | 647 MB | 15 sek       | .rcp         | 15 min 20 sek | 345 MB | 15 min 35 sek    |

|  |      |            |                |      |                         |         |                      |
|--|------|------------|----------------|------|-------------------------|---------|----------------------|
| Eiche, be-<br>laubt,<br>mittlere Ein-<br>stellung (un-<br>gefiltert) | .fls | 2,92<br>GB | 4 min<br>32sek | .rcp | 2 h<br>28 min<br>10 sek | 1,76 GB | 2 h 32 min<br>42 sek |
| Eiche, be-<br>laubt,<br>mittlere Ein-<br>stellung<br>(1x gefiltert)  | .fls | 2,01<br>GB | 15 sek         | .rcp | 1h<br>58 min<br>30 sek  | 1,44 GB | 1 h 58 min<br>45 sek |

Wie die Tabelle zeigt, nimmt der Exportvorgang bei beiden Scaneinstellung zunächst deutliche Zeit in Anspruch. Die exportierte .rcp-Datei ist bei der niedrigen Scaneinstellung und ungefilterten Variante im Vergleich zu der .fls-Ausgangsdatei um über 54 % größer geworden. Vergleicht man dies mit der gefilterten Variante, reduziert sich nicht nur die Exportzeit sondern auch die Dateigröße im Vergleich zur Ausgangsdatei um ca. 53 %. Bei der mittleren Scaneinstellung wird eine deutlich höhere Exportzeit benötigt. Hier reduziert sich die Dateigröße bereits bei der ungefilterten Variante um über 39% im Vergleich zur .fls-Datei. Bei der gefilterten Variante reduzieren sich die Exportzeit und die Dateigröße geringfügig weiter.

Bei dem Direktimport der .rcp-Datei in 3ds Max Design ergibt sich die Problematik, dass die Registrierung bei der Darstellung nicht übernommen wird. Wie die nachfolgende Abbildung zeigt, werden die 4 aufgenommenen Punktwolken als Einzelscans dargestellt.

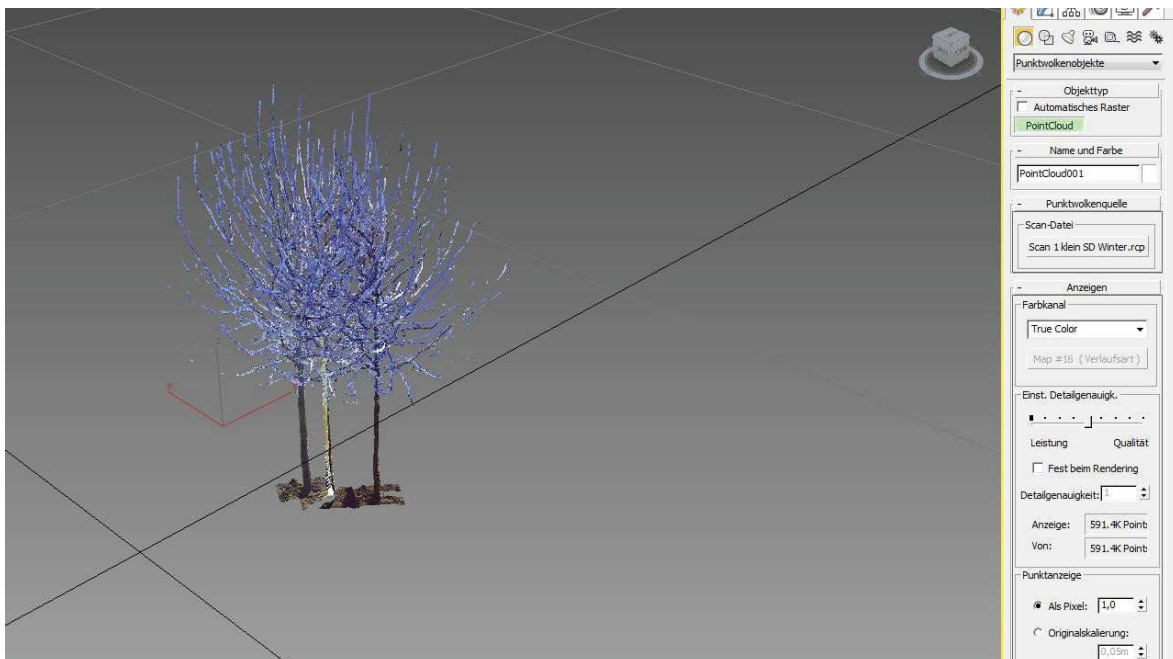


Abbildung 53: .rcp-Direktimport in 3ds Max Design (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)

Neben der .rcp-Datei besteht als zweites die Möglichkeit, eine .rcs-Datei für die Punktwolkendarstellung in 3ds Max Design zu importieren (vgl. Abbildung 52). Hierfür muss eine .fls-Datei zunächst in eine Faro-Projektdatei (.Isproj) abgespeichert oder in eine .rcp-Datei exportiert werden. Anschließend können die Dateiformate in Autodesk ReCap importiert und als .rcs-Datei exportiert werden. Bei einem Importversuch einer .Isproj-Datei bricht Autodesk ReCap jedoch nach wenigen Minuten (ca. 6 Minuten) bereits bei den Aufnahmen mit niedriger Scaneinstellung ab. Deswegen kommt als Alternative nur die .rcp-Datei als Ausgangsbasis zur Erzeugung der .rcs-Datei infrage. Tabelle 59 gibt einen Überblick über die entsprechenden Zeitaufwendungen. Ausgangsbasis sind die in Tabelle 58 generierten .rcp-Dateien.

Tabelle 59: .rcp-Export in .rcs-Datei mit Autodesk ReCap (AUTODESK ReCAP360, Version 4.2.0.2)

| Scanobjekt  | Ausgangs-datei | Größe   | Export-Datei | Dauer Export | Größe   | Dauer Gesamt (.fls -> .rcs) |
|---|----------------|---------|--------------|--------------|---------|-----------------------------|
| Eiche, unbelaubt, niedrige Einstellung (ungefiltert)  | .rcp           | 998 MB  | .rcs         | 1 min 7 sek  | 34,2 MB | 47 min 32 sek               |
| Eiche, unbelaubt, niedrige Einstellung (1x gefiltert) | .rcp           | 345 MB  | .rcs         | 17 sek       | 19,7 MB | 15 min 52 sek               |
| Eiche, belaubt, mittlere Einstellung (ungefiltert)    | .rcp           | 1,76 GB | .rcs         | 4 min 21 sek | 293 MB  | 2 h 37 min 3 sek            |
| Eiche, belaubt, mittlere Einstellung (1x gefiltert)   | .rcp           | 1,44 GB | .rcs         | 3 min        | 145 MB  | 2 h 1 min 45 sek            |

Dementsprechend ist nach den Ergebnissen aus Tabelle 58 und Tabelle 59 nur der Export von der .fls-Ausgangsdatei in die .rcp-Datei aufwendig. Der weitere Export von der .rcp-Datei in die .rcs-Datei verläuft verhältnismäßig schnell. Vorteilhaft ist die deutliche Dateireduzierung. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Ergebnisse der gerenderten Punktwolken in 3ds Max Design.



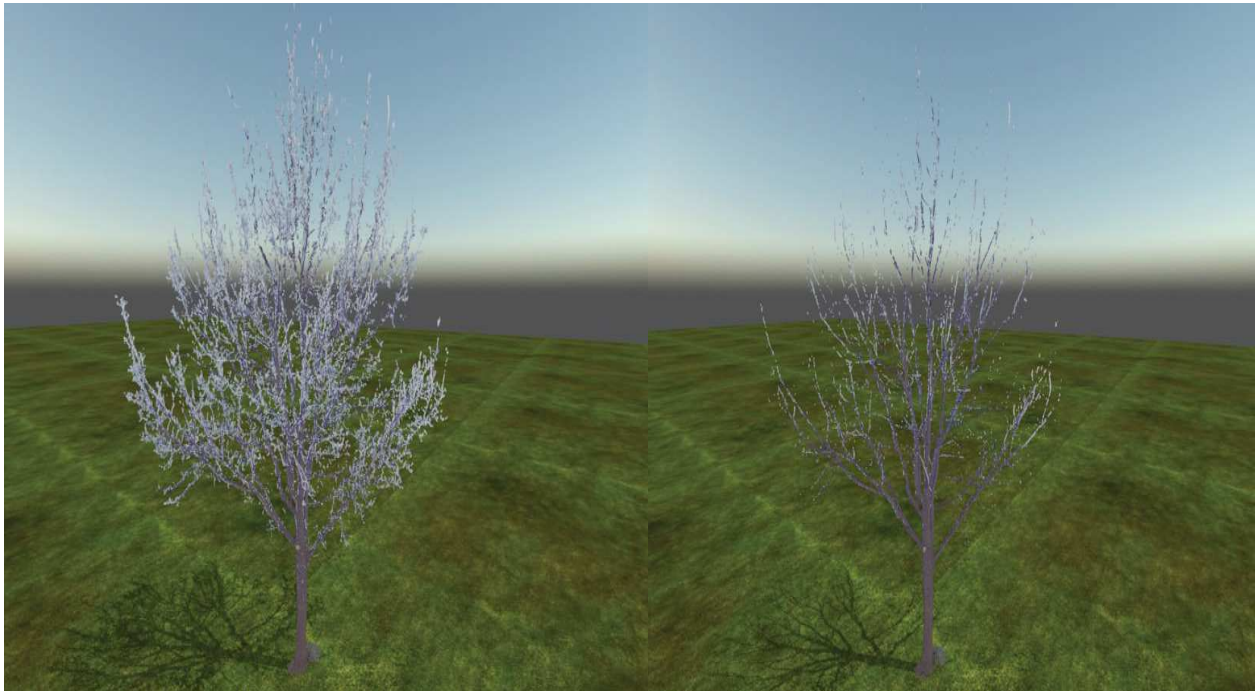


Abbildung 54: Renderergebnis Eiche, niedrige Scaneinstellung, unbelaubt, Vray Renderer 800x600, links ungefiltert, rechts 1x gefiltert (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)



Abbildung 55: Renderergebnis Eiche, mittlere Scaneinstellung, belaubt, Vray Renderer 800x600, links ungefiltert, rechts 1x gefiltert (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)

Damit die importierte Punktwolke in 3ds Max Design gerendert werden kann, ist ein Render-Plugin notwendig. Mit dem Vray-Renderer der Firma Visual Dynamics ® LLC ist dies möglich (VISUAL DYNAMICS ® LLC 2017). Folgende Einstellungen wurden hier getroffen:

- Standardeinstellung Vray Quick Settings
- Auflösung 800 x 600.



Die Renderzeiten betragen jeweils:

- |   |                |
|---|----------------|
| - Eiche, unbelaubt, niedrige Einstellung (ungefiltert)  | → 1 min 18 sek |
| - Eiche, unbelaubt, niedrige Einstellung (1x gefiltert) | → 1 min 14 sek |
| - Eiche, belaubt, mittlere Einstellung (ungefiltert)    | → 1 min 13 sek |
| - Eiche, belaubt, mittlere Einstellung (1x gefiltert)   | → 1 min 7 sek  |

Vorteilhaft ist, dass auch durch die Punktwolkenvisualisierung Schatten generiert werden. Betrachtet man die oben aufgeführten Renderergebnisse fällt auf, dass die Farbdarstellung übernommen wird, jedoch leicht blasser durch den Rendervorgang dargestellt wird. In der Modellansicht von 3ds Max Design werden die Farbwerte noch korrekt dargestellt. Beispielhaft zeigen dies die folgenden Abbildungen.

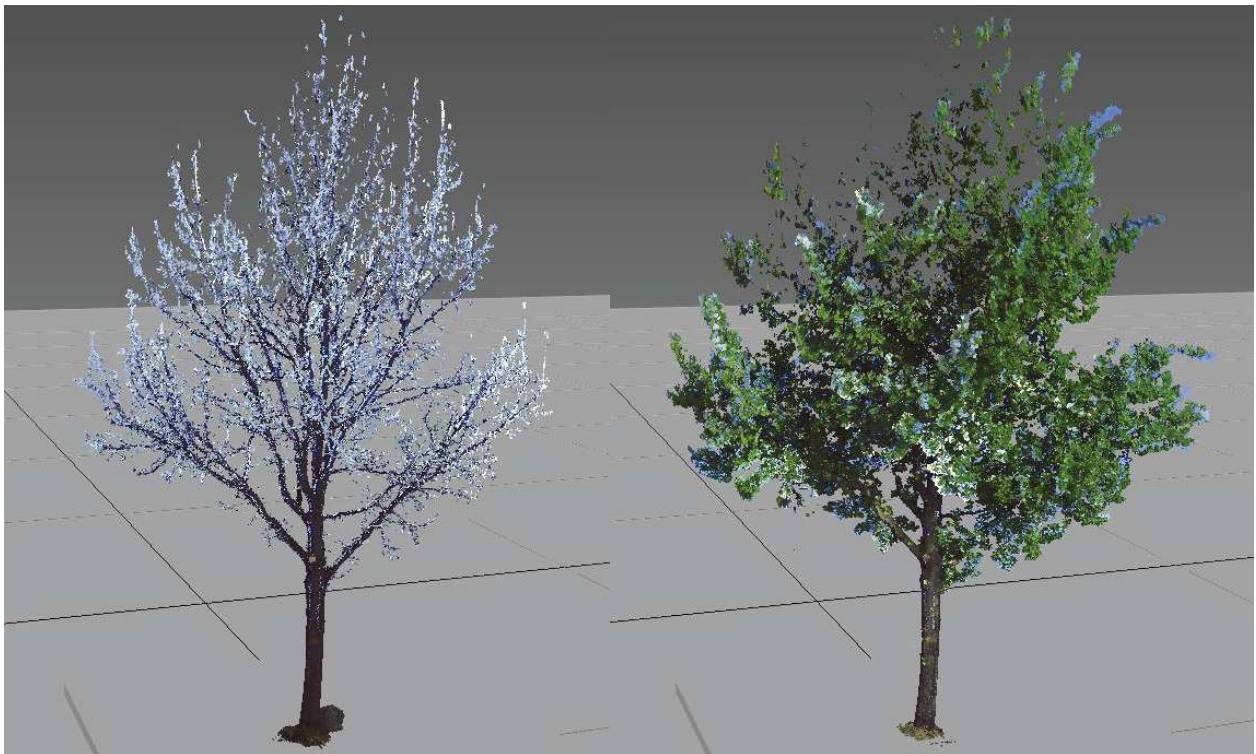


Abbildung 56: Modellansicht 3ds Max Design Eiche, links unbelaubt, rechts belaubt (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)

Um einen Gesamteindruck der erzielten Ergebnisse der Punktwolkenvisualisierung in 3ds Max Design zu erhalten, werden nachfolgend die vermaschten Baummodelle aus Unterkapitel 7.3 zum Vergleich gegenübergestellt. Möglichkeiten zum Import in 3ds Max Design werden in Abbildung 52 aufgezeigt. Die Importmöglichkeit einer .igs-Datei wird ausgeschlossen, da der Vorgang nach 1 Stunde 15 min Ladezeit bereits bei der niedrigen Scaneinstellung abgebrochen wird. Für die mittlere Scaneinstellung wurde dieses Dateiformat in Unterkapitel 7.2 (vgl. Tabelle 22) aufgrund einer extrem zunehmenden Dateigröße nach dem Export ausgeschlossen.

Zum Import des vermaschten Baummodells werden die oben erstellten .obj-Dateien eingesetzt. Da Faro Scene und 3D-Reshaper die akzeptabelsten Vermaschungsergebnisse geliefert haben, werden diese als Vergleichsmaßstab herangezogen. Für den Export in ein .obj-Format fallen folgende Zeitaufwendungen an:

Tabelle 60: Zeitaufwendungen Export in .obj-Datei in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

| Scanobjekt  | Ausgangs-datei | Größe   | Export-Datei | Dauer Export | Größe    | Import in 3ds Max |
|---|----------------|---------|--------------|--------------|----------|-------------------|
| Eiche, unbelaubt, niedrige Einstellung (ungefiltert)  | .fls           | 645 MB  | .obj         | 10 sek       | 50,60 MB | 12 sek            |
| Eiche, unbelaubt, niedrige Einstellung (1x gefiltert) | .fls           | 647 MB  | .obj         | 10 sek       | 50,60 MB | 12 sek            |
| Eiche, belaubt, mittlere Einstellung (ungefiltert)    | .fls           | 2,92 GB | .obj         | 8 sek        | 48,5 MB  | 8 sek             |
| Eiche, belaubt, mittlere Einstellung (1x gefiltert)   | .fls           | 2,01 GB | .obj         | 8 sek        | 49,3 MB  | 8 sek             |

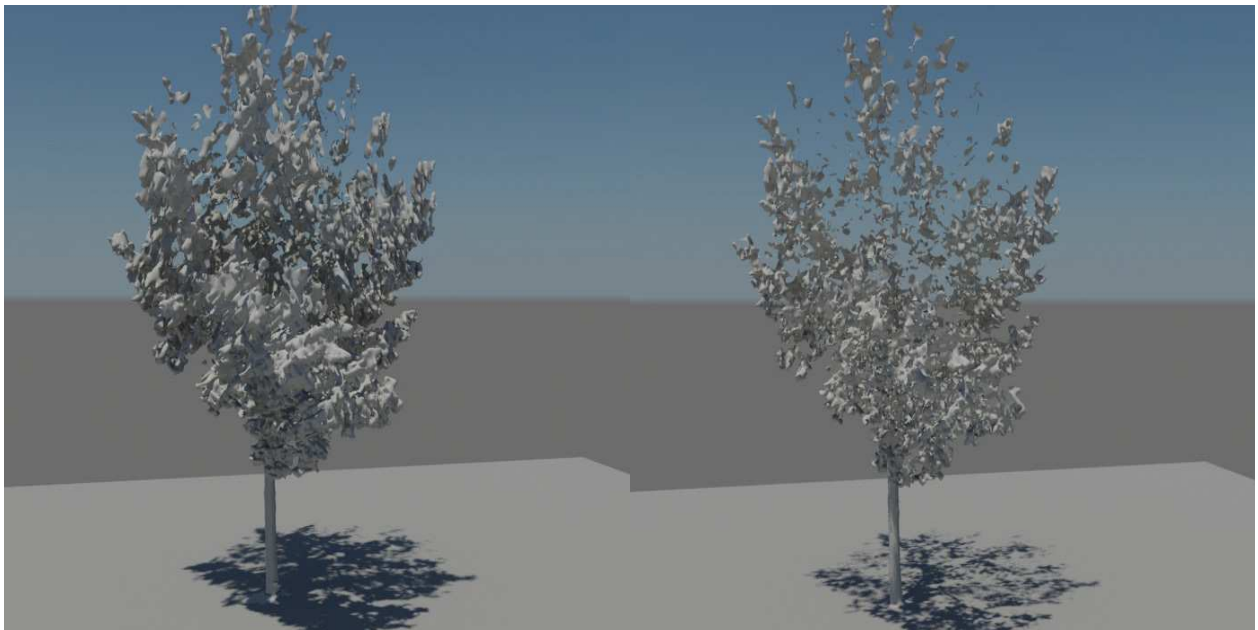
Tabelle 61: Zeitaufwendungen Export in .obj-Datei in 3D-Reshaper (3D-RESHAPER, Version 17.0.24386.0)

| Scanobjekt  | Ausgangs-datei | Größe   | Export-Datei | Dauer Export | Größe   | Import in 3ds Max |
|---|----------------|---------|--------------|--------------|---------|-------------------|
| Eiche, unbelaubt, niedrige Einstellung (ungefiltert)  | .fls           | 645 MB  | .obj         | 2 sek        | 8,97 MB | 9 sek             |
| Eiche, unbelaubt, niedrige Einstellung (1x gefiltert) | .fls           | 647 MB  | .obj         | 2 sek        | 4,67 MB | 4 sek             |
| Eiche, belaubt, mittlere Einstellung (ungefiltert)    | .fls           | 2,92 GB | .obj         | 5 sek        | 108 MB  | 34 sek            |
| Eiche, belaubt, mittlere Einstellung (1x gefiltert)   | .fls           | 2,01 GB | .obj         | 5 sek        | 57,8 MB | 14 sek            |

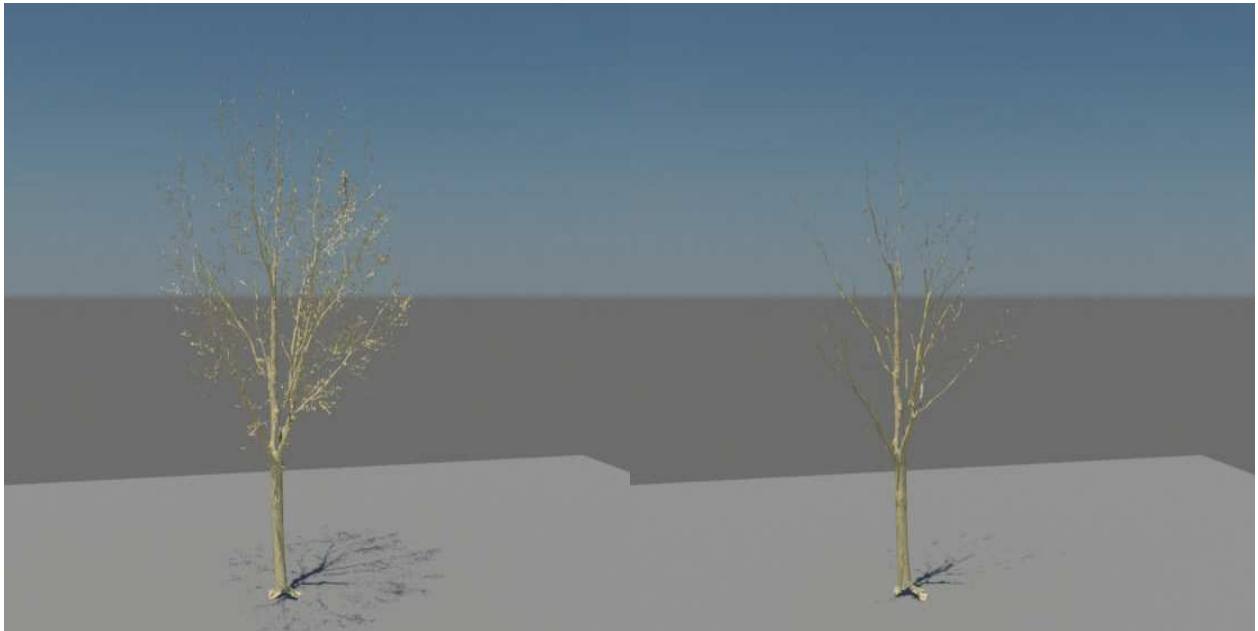
Festzustellen ist, dass durch den Export in eine .obj-Datei durch 3D-Reshaper eine geringere Dateigröße im Vergleich zur .rcs-Datei für die Punktwolkenvisualisierung erzielt wird. Bei Faro Scene wiederum ist die .obj-Datei im Vergleich zur .rcs-Datei bei der niedrigen Scaneinstellung größer und bei der mittleren Scaneinstellung deutlich kleiner. Abbildung 57 bis Abbildung 60 zeigen die erzielten Ergebnisse.



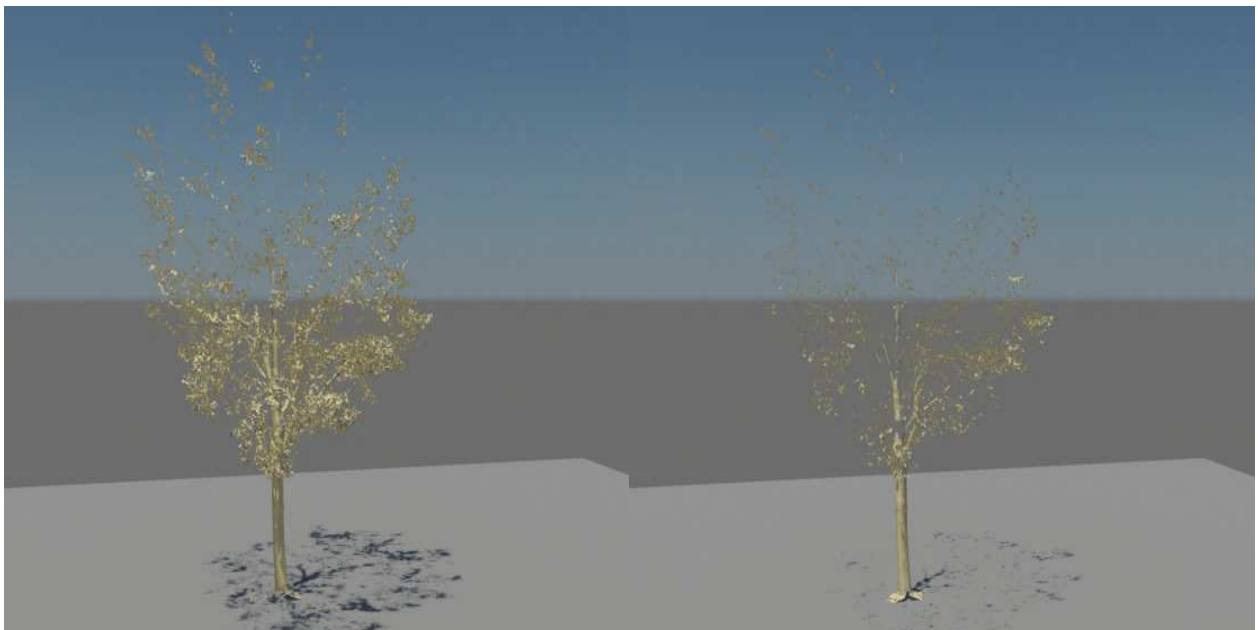
*Abbildung 57: Renderergebnis Faro Scene Eiche, niedrige Scaneinstellung, unbelaubt, Mental-ray Renderer 800x600, links ungefiltert, rechts 1x gefiltert (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)*



*Abbildung 58: Renderergebnis Faro Scene Eiche, mittlere Scaneinstellung, belaubt, Mental-ray Renderer 800x600, links ungefiltert, rechts 1x gefiltert (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)*



*Abbildung 59: Renderergebnis 3D-Reshaper Eiche, niedrige Scaneinstellung, unbelaubt, Mental-ray Renderer 800x600, links ungefiltert, rechts 1x gefiltert (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)*



*Abbildung 60: Renderergebnis 3D-Reshaper Eiche, mittlere Scaneinstellung, belaubt, Mental-ray Renderer 800x600, links ungefiltert, rechts 1x gefiltert (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)*

Im Vergleich zur Punktwolkenvisualisierung wurden die vermaschten Baummodelle mit einem Standard Mental-ray Renderer berechnet. Folgende Einstellungen wurden getroffen:

- Standardeinstellung Mental-ray Daylight
- Auflösung 800 x 600.

Die Renderzeiten betragen jeweils:

#### Faro Scene

- Eiche, unbelaubt, niedrige Einstellung (ungefiltert) → 18 sek
- Eiche, unbelaubt, niedrige Einstellung (1x gefiltert) → 19 sek
- Eiche, belaubt, mittlere Einstellung (ungefiltert) → 25 sek
- Eiche, belaubt, mittlere Einstellung (1x gefiltert) → 24 sek

#### 3D-Reshaper

- Eiche, unbelaubt, niedrige Einstellung (ungefiltert) → 14 sek
- Eiche, unbelaubt, niedrige Einstellung (1x gefiltert) → 11 sek
- Eiche, belaubt, mittlere Einstellung (ungefiltert) → 18 sek
- Eiche, belaubt, mittlere Einstellung (1x gefiltert) → 12 sek

Wie in den Weiterverarbeitungsprogrammen erkennbar war, zeigen die Renderergebnisse aus 3ds Max Design nochmals deutlich, dass die vermaschten Baummodelle aus Faro Scene aufgrund einer geringen Detailschärfe nicht zielführend sind (vgl. Abbildung 57 und Abbildung 58). Hinzu kommt der Verlust der Farbwerte während des Importvorganges.

Beim Import der .obj-Datei aus 3D-Reshaper werden die Farbwerte übernommen. Hier wird jedoch auf dem ganzen Baummodell nur ein Farbwert übertragen. Wie in der Ergebnisaufführung zu 3D-Reshaper festgestellt, entspricht der Farbwert somit nicht der Realität. In diesem Zuge besteht in 3ds Max Design die Möglichkeit, Modellen nachträglich Texturen zuzuweisen. Dieser Arbeitsschritt muss jedoch manuell erfolgen und ist sehr zeitaufwendig. Darüber hinaus ist die Detailschärfe nicht ausreichend. Bei der ungefilterten Vermaschung gehen bei den Sommeraufnahmen bereits erhebliche Teile des Kronenbereiches verloren (Abbildung 60).

Stellt man die Punktwolkenvisualisierung der vermaschten Visualisierung gegenüber, wird durch die Punktwolkenvisualisierung eine höhere Detailschärfe und eine bessere Übernahme von Farbwerten erzielt. Durch eine realitätsnahe Schattendarstellung wird dies weiter bekräftigt. Nachteilig bei dieser Visualisierungsmethode ist die deutlich höhere Zeitaufwendung. Im Anhang unter 4. Gesamtzeitaufwendungen vom Dateimport bis zur Visualisierung, S. 92ff. werden die Gesamtbearbeitungszeiten von der Aufnahme über die Weiterverarbeitung bis zur Visualisierung für beide Visualisierungsmethoden aufgeführt. Beträgt die Gesamtbearbeitungsdauer bei der niedrigen



Scaneinstellung für die vermaschte Visualisierung, ungefiltert in Faro Scene 44 min 7 sek, liegt die Gesamtbearbeitungsdauer für die Punktwolkenvisualisierung bei 1 h 28 min 51 sek. Noch deutlicher wird der Zeitaufwand bei der mittleren Scaneinstellung. In Summe beträgt die Gesamtbearbeitungsdauer für die vermaschte Visualisierung hier 1 h 41 min 19 sek im Vergleich zu 3h 59 min 29 sek für die Punktwolkenvisualisierung. Somit ist mindestens von einer doppelt so langen Bearbeitungszeit auszugehen.

Aufgrund der durch die Laserscan-Aufnahmen generierten Ausgangsdateien und die Importmöglichkeiten in 3ds Max Design ist ein weiteres Austauschformat als Punktwolke nicht gegeben. Um den Faktoren der menschlichen Wahrnehmung so gerecht wie möglich zu werden, wird eine längere Bearbeitungszeit für eine höhere Detailschärfe in Kauf genommen. Betrachtet man das Verhältnis zwischen Aufnahme- und Weiterverarbeitungsaufwand, liegt dies bei der Punktwolkenvisualisierung bei der mittleren Scaneinstellung im Extremfall bei ca. 1:5,5. Dieser Wert liegt im Bereich der in den Grundlagen zur Visualisierung (vgl. 4.1.3) angegebenen Richtwerten und befindet sich im unteren Drittel. Somit ist die Gesamtbearbeitungszeit als verhältnismäßig einzustufen.

Neben 3ds Max Design ist Maxon Cinema 4d ein weiteres verbreitetes Visualisierungsprogramm, das in Unterkapitel 4.2.1 vorgestellt wurde. In Abbildung 52 sind mögliche Importformate aufgelistet. Für eine Punktwolkenvisualisierung steht auf Basis der Laserscan-Ausgangsdatei nur das Format .wrl zur Verfügung. Eine als .wrl exportierte Baumpunktwolkendatei lässt sich in Cinema 4d importieren, zeigt aber hier keinen Inhalt an. Weitere Austauschformate zwischen 3ds Max und Cinema 4d (.FBX und .3ds) übernehmen ebenfalls keine Punktwolkendarstellung (Maxon Cinema 4d, Version R14).

Wie bei 3ds Max besteht auch bei Cinema 4d die Möglichkeit, die zuvor erstellten .obj-Dateien als vermaschtes Modell zu importieren.



Abbildung 61: Visualisierung in Cinema 4d, links Eiche unbelaubt, niedrige Scaneinstellung, rechts Eiche belaubt, mittlere Scaneinstellung, gerendert mit Auflösung 800 x 600 (MAXON CINEMA 4D, Version R14)

Wie man auf den Abbildungen erkennt, werden beim Import der generierten .obj-Dateien der Baummodelle keine Farbwerte übernommen. Aufgrund keinerlei Importmöglichkeit der direkten Punktwolken sowie fehlenden Farbwertübernahmen entstehen keinerlei Programmvorteile gegenüber 3ds Max Design. Deswegen wird Cinema 4d für die Visualisierung von Baummodellen im nachfolgenden nicht weiter in Betracht bezogen.

Unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Programme und den oben durchgeführten Funktionstestungen der einzelnen Programme sowie ersten daraus formulierten Tendenzen lassen sich für die Filterung, Vermaschung und Visualisierung von Baummodellen folgende Verarbeitungsschritte und Programme für ein standardisiertes Verfahren festlegen:

- Allgemeine Punktwolkendarstellung in Faro Scene als .fls-Direktimport
- Punktwolkenfilterung bei unbelaubten Aufnahmen mit Faro Scene, nur ein Filtervorgang
- keine Punktwolkenfilterung bei belaubten Aufnahmen
- Vermaschung ohne größere manuelle Bearbeitungen nicht zielführend
- Punktwolkenvisualisierung mit 3ds Max Design
- Optional: Visualisierung als vermaschtes Objekt, mit einem Filtervorgang und Vermaschung in 3D-Reshaper unter Berücksichtigung aufwendiger manueller Rekonstruktion und Texturierung, jedoch nur für unbelaubte Aufnahmen sinnvoll

Um die als Optimum eingestuften Baumpunktwolken und optional vermaschten Modelle hinsichtlich Realitätsgrad und Anwendungstauglichkeit weiter zu beurteilen, werden die Modelle im nachfolgenden Unterkapitel mit bestehenden 3D-Gehölzdatenbanken verglichen.

## 7.4 Vergleich mit bestehenden Gehölzdatenbanken

Neben der dreidimensionalen Erfassung von Echtzeit-Baummodellen gibt es Gehölzbibliotheken, die computergenerierte Pflanzenmodelle anbieten (vgl. 4.2.3). Nachteil dieser computergenerierten Modelle ist, dass Sie als symbolhaftes Element erzeugt werden, aber kein individuelles Echtzeit-Modell widerspiegeln. Gemäß Tabelle 7 in Unterkapitel 4.2.3 sind xFrog, Laubwerk und VB Visual drei gängige 3D-Gehölzdatenbanken. Im Nachfolgenden wird die aufgenommene Eiche mit ähnlichen Baumexemplaren aus den Gehölzdatenbanken verglichen. Hierzu werden diese in 3ds Max Design importiert und gerendert, um Messgrößen wie Punktzahl und Dateigrößen miteinander zu vergleichen.

*Tabelle 62: Eigenschaften der visualisierten Echtzeit-Baummodelle (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)*

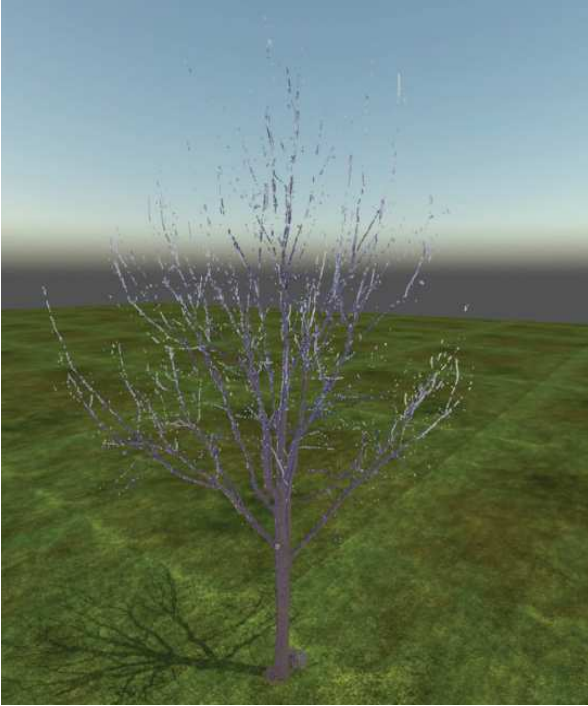
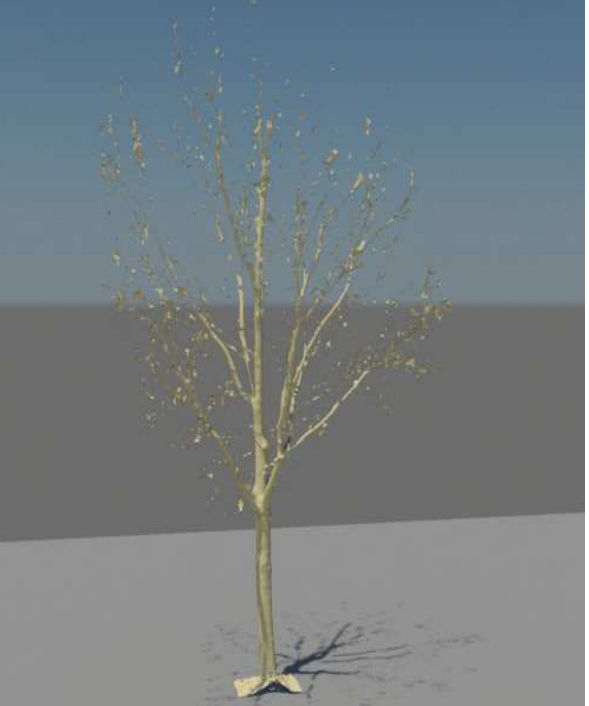
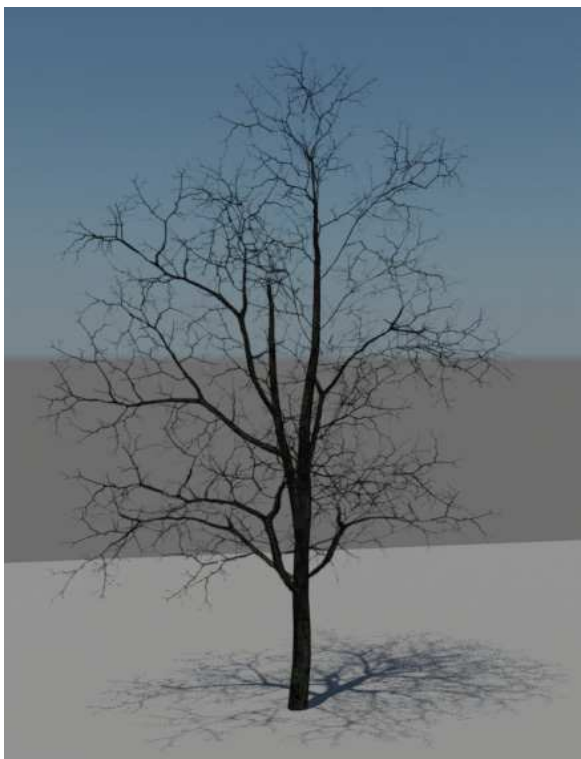

| Eiche unbelaubt, 1x gef. mit Faro Scene, niedrige Scaneinstellung, Punktwolken-visualisierung      | Eiche unbelaubt, 1x gef. und vermascht mit 3D-Reshaper, niedrige Scaneinstellung               |
|--|--|
|                 |            |
| Punktzahl: 1.597.006<br>Polygonanzahl: -<br>Renderzeit: 1 min 14 sek<br>Dateigröße: 19,7 MB (.rcs) | Punktzahl: 55.383<br>Polygonanzahl: 90.436<br>Renderzeit: 11 sek<br>Dateigröße: 4,67 MB (.obj) |

Tabelle 63: *Eigenschaften von Beispielobjekten aus computergenerierten Gehölzdatenbanken (AUTODESK MAX DESIGN, Version 2015; RENDERMALL GMBH 2012c; LAUBWERK GMBH 2011c)*

| VB Visual<br>(Eiche, 11m, Wintertextur highres)  | Laubwerk<br>(Stieleiche, Standard)  |
|--|---|
|                  |                        |
| Punktzahl: 4.502<br>Polygonanzahl: 5.076<br>Renderzeit: 3 min 8 sek<br>Dateigröße: 0,505 MB (.max) | Punktzahl: 1.081.509<br>Polygonanzahl: 1.278.396<br>Renderzeit: 2 min 56 sek<br>Dateigröße: 114 MB (.lbw) |

Die Dateigröße der jeweiligen Modelle reicht von 0,505 MB bis 114 MB. Hierbei liegen die Echtzeit-Modelle im Mittelfeld, wobei die vermaschte Version mit 4,67 MB deutlich kleiner ist als die reine Punktwolke (19,7 MB). Im Gegenzug weist die Punktwolkenvisualisierung eine deutlich höhere Punktzahl auf. Am nächsten an dieser Punktdichte liegt das Laubwerk-Modell mit 1.081.509 Punkten, wobei hier die höchste Dateigröße erzielt wird. Besonders auffallend ist, dass das VB Visual-Modell mit kleinster Punktzahl und Dateigröße die längste Renderzeit aufweist. Die geringste Renderzeit wird mit den beiden Echtzeitmodellen erzielt. Beide dargestellten Gehölzdatenbanken-Modelle zeichnen sich durch eine hohe Detailschärfe aus. Das VB Visual-Modell vermittelt die klarste Struktur eines unbelaubten Gehölzes, da Feinäste bis in die Spitzen erkennbar sind. Feinäste sind auch in dem Echtzeit-Punktwolkenmodell erkennbar, jedoch zeichnet sich hier die leicht falsche Farbübertragung durch Messrauschpunkte negativ aus. Abbildung 62 betrachtet die beiden Modelle im Nahbereich.





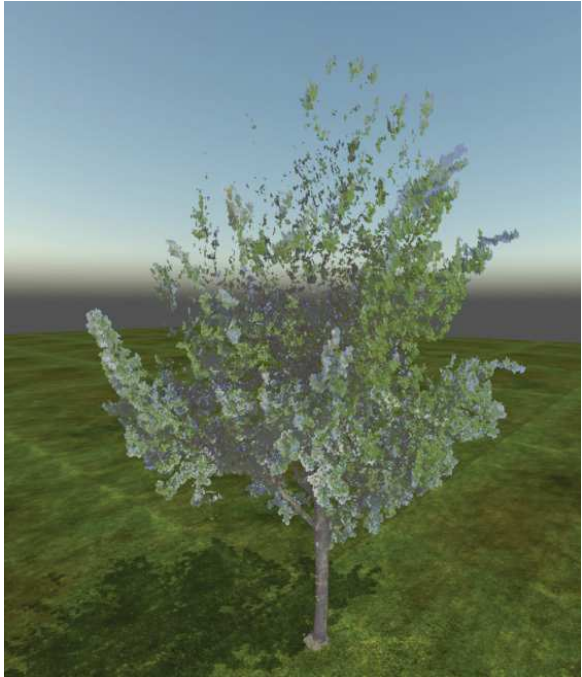
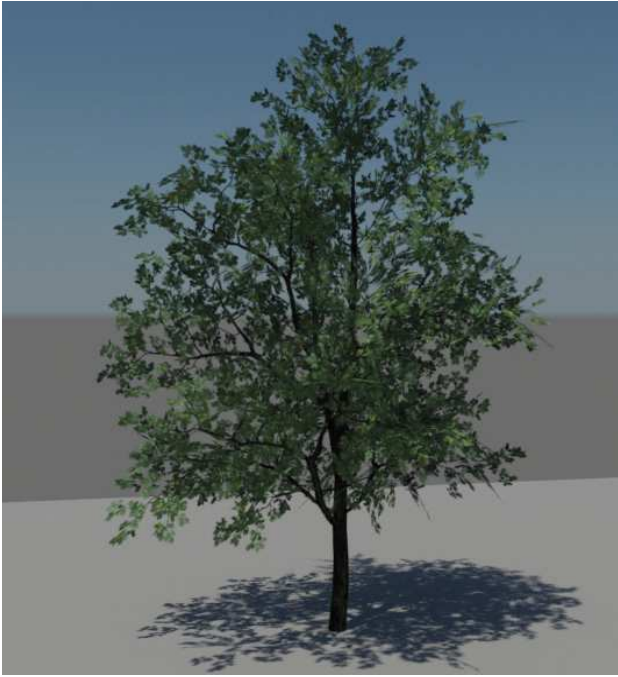
Abbildung 62: Nahbereich-Vergleich Punktwolken- (links) und VB Visual-Modell (rechts) (AUTODESK MAX DESIGN Version 2015)

Im Nahzoom wird deutlich, dass bei dem Punktwolken-Modell erste Feinäste im Spitzenbereich aufgelöst werden. Dennoch wirkt das Echtzeit-Modell durch unregelmäßige Wuchsformen und Details wie Astwunden natürlicher. Das VB Visual-Modell besitzt einen unveränderten geradlinigen Leittrieb. Die Feinäste werden nur zweidimensional als Fläche dargestellt. Die Textur des Echtzeit-Modells wird, wie erwähnt, durch Messrausch- und Renderbeeinflussungen verfälscht. Bei der Punktwolkenvisualisierung, dem VB Visual- und Laubwerk-Modell wird eine mehrfarbige Baumtextur übertragen, währenddessen das vermaschte Echtzeit-Modell nur eine einheitliche Farbtextur aufweist. Auf den ersten Blick ähnelt das vermaschte Modell dem VB Visual-Modell hinsichtlich Stamm und Astanläufen. Jedoch sind hier im Detailbereich (Feinäste, Kronenspitze) starke Punktverluste und Störpunkte vorhanden.



Im Anschluss wird die belaubte Aufnahme mit Modellen aus Gehölzdatenbanken verglichen.

*Tabelle 64: Eigenschaften eines visualisierten Echtzeit-Baummodells und eines computergenerierten aus einer Gehölzdatenbank (AUTODESK MAX DESIGN; RENDERMALL GMBH 2012c)*

| Eiche belaubt, ungefiltert, mittlere Scanauflösung, Punktwolkenvisualisierung                      | VB Visual<br>(Eiche, 11m, Sommertextur highres)   |
|--|---|
|                  |                  |
| Punktzahl: 56.078.907<br>Polygonanzahl: -<br>Renderzeit: 1 min 13 sek<br>Dateigröße: 293 MB (.rcs) | Punktzahl: 4.502<br>Polygonanzahl: 5.076<br>Renderzeit: 2 min 26 sek<br>Dateigröße: 0,505 MB (.max) |

*Tabelle 65: Eigenschaften von Beispielobjekten aus computergenerierten Gehölzdatenbanken (AUTODESK MAX DESIGN, Version 2015; LAUBWERK GMBH 2011c; xFrog 2017c)*


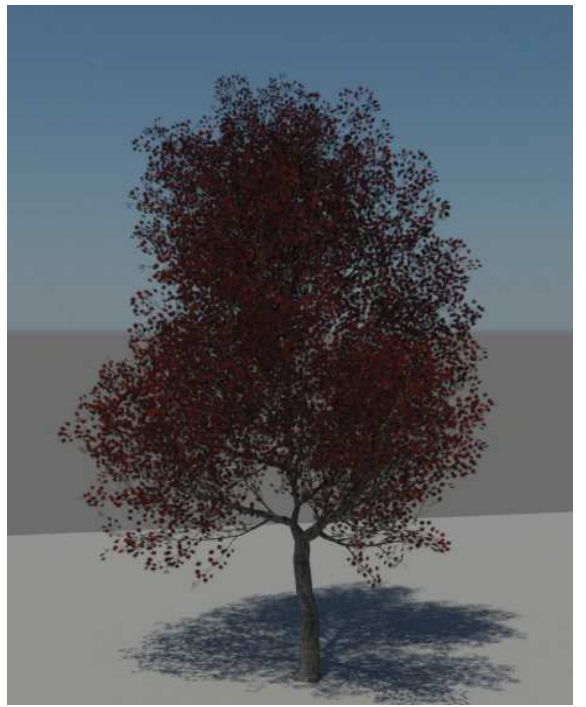
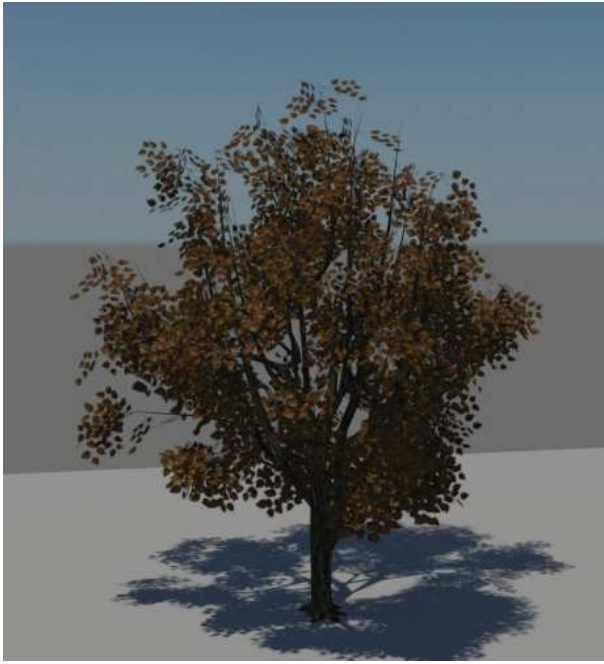
| Laubwerk<br>(Stieleiche, Standard)   | xFrog<br>(Acer rubrum, Red Maple)   |
|--|---|
|    |                                        |
| <p>Punktzahl: 1.491.090</p> <p>Polygonanzahl: 1.728.148</p> <p>Renderzeit: 2 min 57 sek</p> <p>Dateigröße: 114 MB (.lbw)</p> | <p>Punktzahl: 147.035</p> <p>Polygonanzahl: 204.902</p> <p>Renderzeit: 3 min 27 sek</p> <p>Dateigröße: 10,1 MB (.max)</p> |

Tabelle 66: *Eigenschaften von Beispielobjekten aus computergenerierten Gehölzdatenbanken (AUTODESK MAX DESIGN; MARLIN STUDIOS 2016b)*

|  |
|--|
| TreeFarm<br>(orangegreen)  |
|  |
| Punktzahl: 9.382   |
| Polygonanzahl: 10.174  |
| Renderzeit: 3 min 31 sek   |
| Dateigröße: 0,783 MB (.max)  |

Auch bei den Sommer-Modellen wird bei VB Visual mit 0,505 MB die geringste Dateigröße erzielt. Darauf folgt das Modell von TreeFarm mit 0,783 MB. Als besonders groß stellt sich das Echtzeit-Punktwolkenmodell mit 293 MB heraus. Dementsprechend wird auch hier mit 56.078.907 Punkten die höchste Punktzahl erzielt. Die nächst höhere Punktzahl wird wie bei den Winter-Modellen mit dem Laubwerk-Modell erreicht. Das VB Visual Sommer-Modell weist dieselbe Punktzahl wie das Winter-Modell auf. Renderzeiten vollstrecken sich über Zeiten von 1 min 13 sek bis 3 min 31 sek. Auch hier zeichnet sich das Echtzeit-Modell durch die geringste Renderzeit aus. Hohe Renderzeiten durchlaufen die Modelle von xFrog und TreeFarm. Im Detailbereich ähnelt sich das Punktwolken- und VB Visual-Modell hinsichtlich der Blattdarstellung. Einzelne Blätter können erahnt, aber nicht im Detail erkannt werden. In der nachfolgenden Abbildung werden die beiden Modelle im Nahbereich gegenübergestellt.

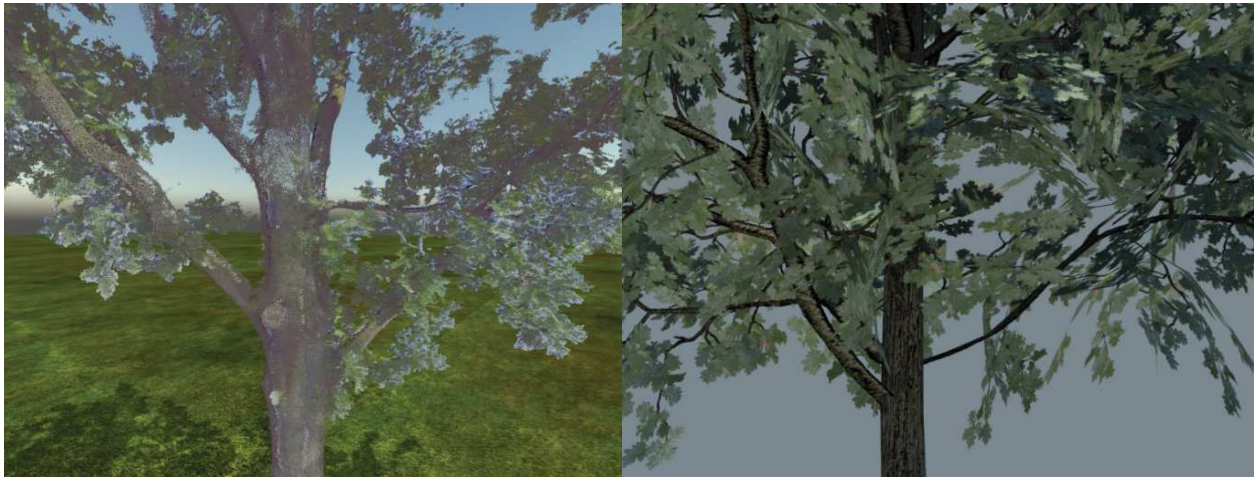


Abbildung 63: Nahbereich-Vergleich Punktwolken- (links) und VB Visual-Modell (rechts), Blattstruktur (AUTODESK MAX DESIGN Version 2015)

Im Nahzoom erkennt man, dass die Blätter des Echtzeit-Modells realistischer und weniger konstruiert wirken. Dennoch zeigen sich infolge der Punktwolkenvisualisierung erste Lücken. Insbesondere im Astspitzenbereich kommt das Punktwolkenmodell an seine Grenzen, da Spitzen nur punktuell und unvollständig dargestellt werden. Eine deutlichere Blatterkennung weisen die restlichen Modelle auf, wobei die 3D-Gehölzdatenbank Laubwerk den höchsten optischen Detaillierungsgrad erreicht. Die Farbwerte und der Schattenwurf werden bei allen Modellen dargestellt und es ist über unterschiedliche Texturen eine Wiedererkennung der Gehölze möglich. Bei dem Echtzeit-Modell sind leichte Farbabweichungen infolge des Messrauschens festzustellen.

Im Gesamtergebnis lässt sich festhalten, dass die Echtzeit-Baummodelle in einigen Punkten mit den generierten Modellen aus Gehölzdatenbanken mithalten können. Insbesondere in Punkto Renderzeit und Punktzahl liegen die Echtzeit-Modelle vorne. Weiterhin sind die erzielten Dateigrößen für die Winter-Modelle vertretbar. Durch den Vergleich mit den Gehölzdatenbanken wird die Möglichkeit der Anwendung eines vermaschten Echtzeit-Baummodells mit den auftretenden Defiziten noch einmal deutlich eingeschränkt. Hierbei wird die Notwendigkeit einer optionalen manuellen Bearbeitung der Baummodelle deutlich. Aufgrund hoher Zeitaufwendungen für die manuelle Bearbeitung wird diese Möglichkeit der Visualisierung bewusst als optional eingestuft und in der weiteren Bearbeitung nicht mehr verfolgt.

## 8 Durchführung und Ergebnisse der Hauptaufnahmen

Die Hauptaufnahmen werden sowohl im Frühling (unbelaubter Baumzustand) als auch im Sommer (belaubter Baumzustand) unter Anwendung der in Kapitel 6 festgelegten Scaneinstellungen durchgeführt und mit den ausgewählten Programmen aus Kapitel 7 weiterverarbeitet. Hierbei wird das zuvor festgelegte standardisierte Verfahren angewendet.

### 8.1 Durchführung Winteraufnahmen

Die Winteraufnahmen werden, wie in den vorherigen Kapiteln festgelegt, mit folgenden Rahmenbedingungen aufgenommen und weiterverarbeitet:

- Aufnahme der kleineren Gehölze in niedriger und mittlerer Scaneinstellung
- Aufnahme der großen Gehölze in mittlerer Scaneinstellung
- Punktwolkendarstellung in Faro Scene als .fls-Direktimport
- Punktwolken beider Gehölzgrößen 1x filtern mit Faro Scene
- Punktwolkenvisualisierung mit 3ds Max Design.

#### 8.1.1 Bestandsaufnahme

In der allgemeinen Vorgehensweise unter 5.1 wurde erläutert, dass die Gehölzaufnahmen auf einem Baumschulgelände in Bad Zwischenahn durchgeführt werden. Am 22.03.2017 wurden für die Aufnahmen im unbelaubten Zustand insgesamt 2 Platanen (*Platanus acerifolia*) unterschiedlicher Größe aufgenommen. Die größere Platane steht auf einem Baumschulfeld an der Straße „Grüne Linie“.



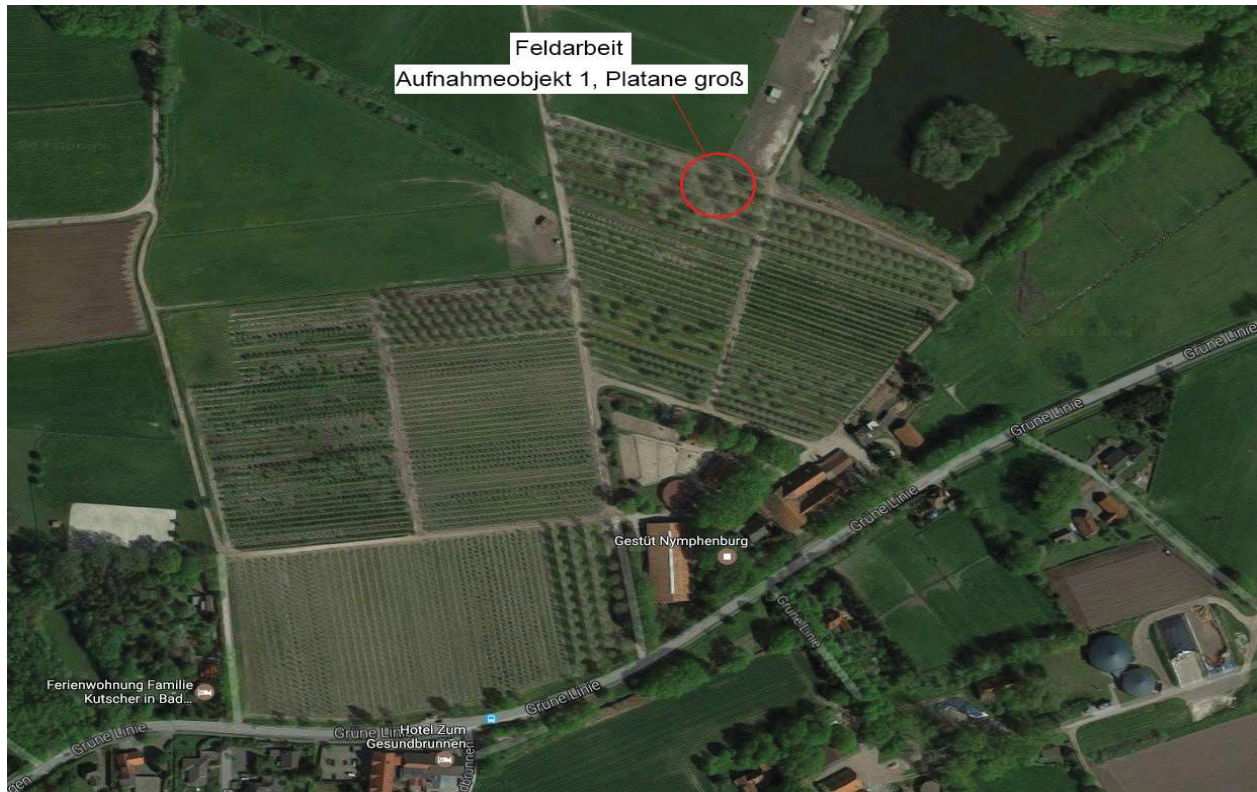


Abbildung 64: Untersuchungsgebiet 2: große Platane (Kartenauszug aus AEROWEST, KARTENDATEN 2017, GEOBASIS-DE/BKG 2017, GOOGLE, 53°13'27.2"N 8°01'36.5"E)

Wie man auf dem Luftbild erkennt, befinden sich auf der Aufnahmefläche mehrere Platanen gleicher Größe und Qualität in Reihe stehend. Die Geländeumgebung des Aufnahmeumfeldes ist eben.



Abbildung 65: Aufnahmeobjekt 1, Platane groß



Die Abbildung zeigt die große Platane. Sie weist folgende Merkmale auf:

- Name: *Platanus acerifolia*, 7xv
- Höhe: ca. 15-20 m
- Kronen-Durchmesser: ca. 9 m
- Stammumfang: 1,06 m
- Alter: 30-35 Jahre
- Oberflächenbeschaffenheit/Rinde: plattig

Aufgrund der größeren Baumdimension der Platane im Vergleich zur Eiche aus den Testaufnahmen mit einem vorhandenen Kronendurchmessers von ca. 9,0 m und der dichteren Ast- bzw. Kronenstruktur wird die mittlere Scaneinstellung ( $\frac{1}{2}$  Auflösung, 3x Qualität) mit insgesamt 4 Gerätestandpunkten und 6 Referenzkugeln um den Baum herum gewählt. Nach FARO (2013 a) beträgt die Netto Scanzeit 14 Minuten und 19 Sekunden im vollen Bereich ( $360^\circ$ ) (vgl. Kapitel 5.2, Tabelle 9). Die Gesamtzeit für die Einzelbaumaufnahme beträgt 1 Stunde 26 Minuten inklusive Geräteumstellung. Alle weiteren Einzelheiten sowie Bilder und Standortskizze dieser und den nachfolgenden Aufnahmen sind den Anlagen (3.1 Vermessungs-Protokoll vom 22.03.2017, Aufnahme gr. Platane, unbelaubt, in mittlerer Scaneinstellung, S.72 ff.) zu entnehmen.

Der zweite Baum, die kleinere Platane steht auf einem anderen Baumschulfeld an der Hüllsteder Straße in Bad Zwischenahn. Auch hier stehen mehrere Objekte gleicher Größe und Qualität in Reihe. Das Geländeumfeld ist wie Baumfeld 1 eben.

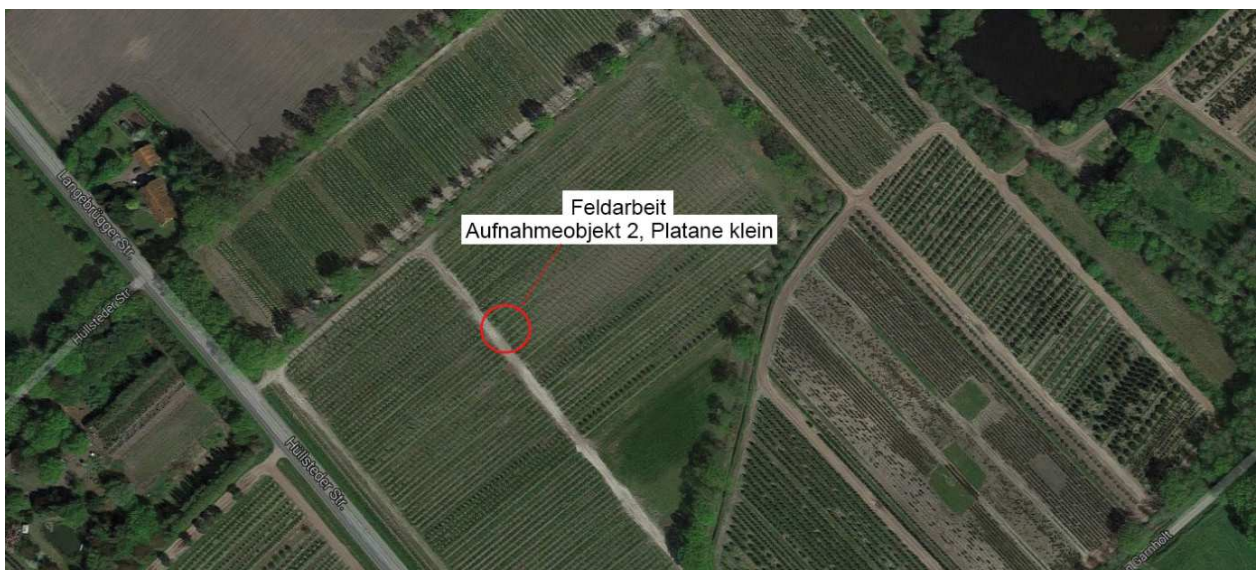


Abbildung 66: Untersuchungsgebiet 3, kleine Platane (Kartenauszug aus AEROWEST, KARTENDATEN 2017, GEOBASIS-DE/BKG 2017, GOOGLE 2009,  $53^\circ 14' 26.1''\text{N}$   $7^\circ 59' 14.0''\text{E}$ ).



Abbildung 67: Aufnahmeobjekt 2, Platane klein

Abbildung 67 zeigt die kleinere Platane. Sie weist folgende Merkmale auf:

- Name: *Platanus acerifolia*, 3xv
- Höhe: ca. 6-8 m
- Kronen-Durchmesser: ca. 3 m
- Stammumfang: 0,305 m
- Alter: 12-15 Jahre
- Oberflächenbeschaffenheit/Rinde: plattig

Aufgrund des geringen Kronendurchmessers von 2,90 m werden nur 3 Gerätestandpunkte statt 4 gewählt. Bei der niedrigen Scaneinstellung liegt die Netto Scanzeit bei 3 Minuten und 35 Sekunden (FARO 2013 a) (vgl. Kapitel 5.2, Tabelle 9). Die Gesamtscanzeit inkl. Ge-

räteumstellung beträgt bei der mittleren Scaneinstellung 59 Minuten und bei der niedrigen Scaneinstellung 25 Minuten. Alle weiteren Einzelheiten sowie Bilder und Standortskizze sind wieder den Anlagen (3.2 und 3.3 Vermessungs-Protokoll vom 22.03.2017, Aufnahme kl. Platane, unbelaubt, in mittlerer und niedriger Scaneinstellung, S. 76ff.) zu entnehmen.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die aufgenommenen Bäume mit zugehöriger Qualität, Anzahl der Standpunkte und Gesamtscandauer im Überblick.

Tabelle 67: Schnellübersicht Winteraufnahmen

| Nr. | Datum      | Baum  | Veg.-Per. | Scan-einstellung    | Anzahl Standpkt. | Gesamt-Scandauer |
|-----|------------|---|-----------|---------------------|------------------|------------------|
| 1   | 22.03.2017 | Platane groß 1, Feld Baumschule<br>Bad Zwischenahn  | unbelaubt | 1/2 Aufl., 3x Qual. | 4                | 1h 26 min        |
| 2   | 22.03.2017 | Platane klein 1, Feld Baumschule<br>Bad Zwischenahn | unbelaubt | 1/2 Aufl., 3x Qual. | 3                | 59 min           |
| 2   | 22.03.2017 | Platane klein 1, Feld Baumschule<br>Bad Zwischenahn | unbelaubt | 1/4 Aufl., 3x Qual. | 3                | 25 min           |


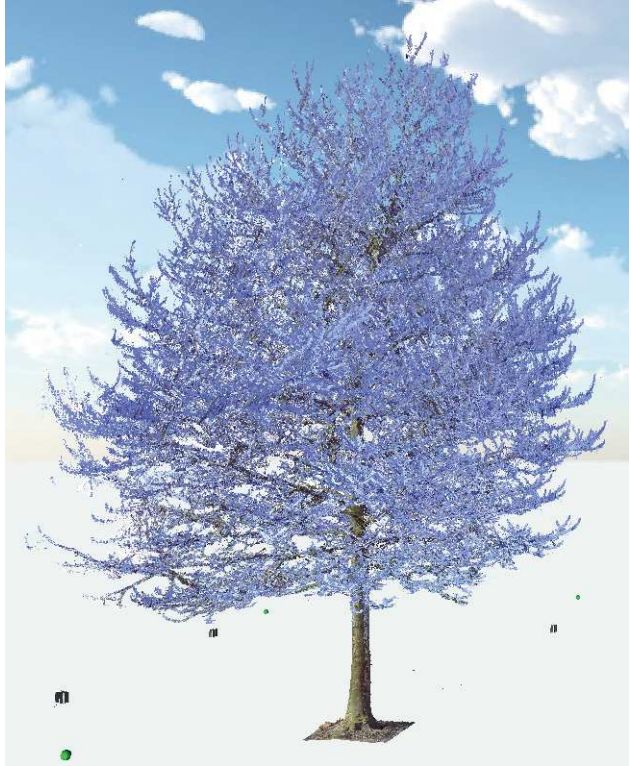
Mit der Reduzierung der Standpunktanzahl wird eine geringere Gesamt-Scandauer erreicht. Weiter verringert wird diese durch die Anwendung der niedrigen Scaneinstellung.



### 8.1.2 Auslesung und Darstellung der Punktwolken

Insgesamt wurden im unbelaubten Zustand in 8.1.1 zwei Bäume mit zwei unterschiedlichen Scaneinstellungen aufgenommen (siehe Tabelle 67). Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse als Punktwolke in Faro Scene dargestellt.

Tabelle 68: .fls-Direktimport Platane groß Winter, mittlere Scaneinstellung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

| Baum Nr. 1, Platane groß (mittlere Scaneinstellung)                                |  |
|--|--|
| Bild   | Punktwolke   |
|  |                                 |
|  | Punktanzahl: 23.965.032<br>Dateiformat: .fls<br>Dateigröße: 2,33 GB<br>Punktwolkenimport/-erstellung: 4 min 26 sek |

## 8 Durchführung und Ergebnisse der Hauptaufnahmen

Tabelle 69: .fls-Direktimport Platane klein Winter, mittlere Scaneinstellung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)


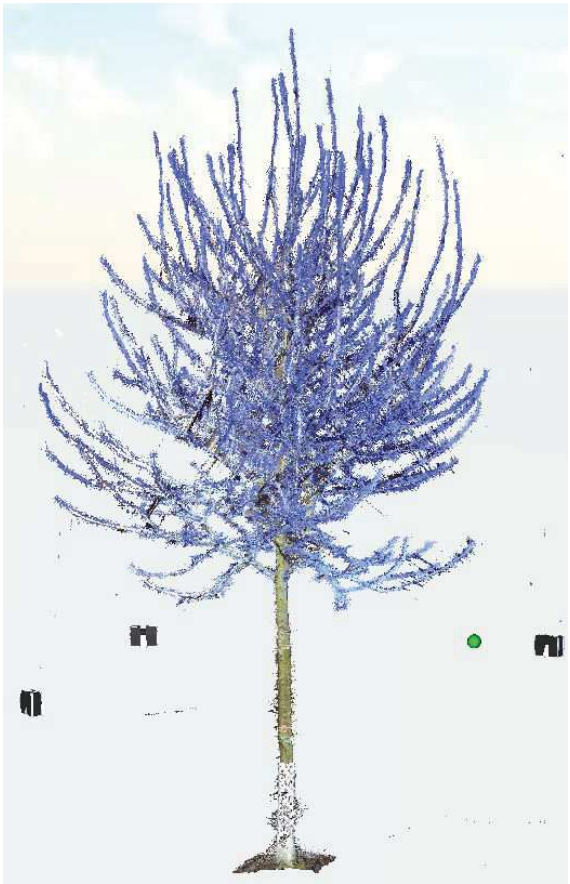

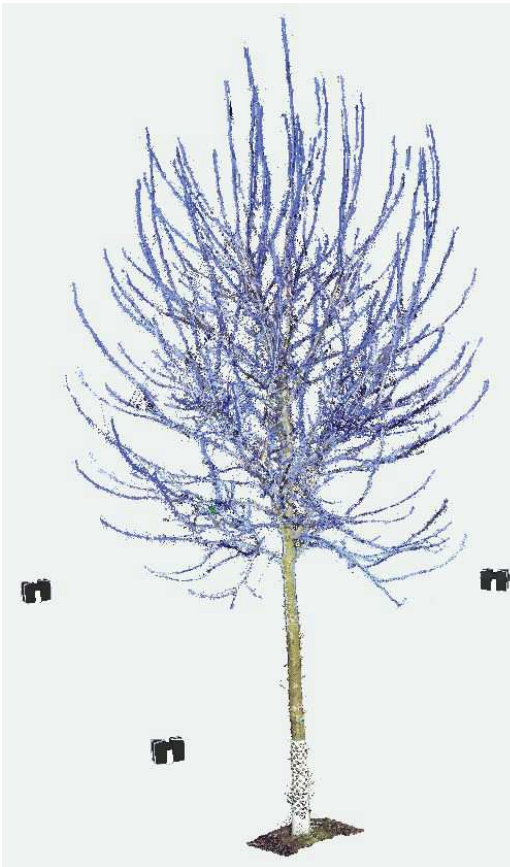
| Baum Nr. 2, Platane klein (mittlere Scaneinstellung)                               |  |
|--|--|
| Bild   | Punktwolke   |
|  |   |
|  | <p>Punktanzahl: 8.602.223</p> <p>Dateiformat: .fls</p> <p>Dateigröße: 1,53 GB</p> <p>Punktwolkenimport/-erstellung: 3 min 15 sek</p> |



Tabelle 70: .fls-Direktimport Platane klein Winter, niedrige Scaneinstellung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

| Baum Nr. 2, Platane klein (niedrige Scaneinstellung)                               |  |
|--|--|
| Bild   | Punktwolke   |
|  |                       |
|  | Punktzahl: 1.749.908<br>Dateiformat: .fls<br>Dateigröße: 523 MB<br>Punktwolkenimport/-erstellung: 42 sek |

Die nachfolgende Tabelle listet die wichtigsten Eigenschaften zur Darstellung der aufgenommenen Punktwolken auf.

Tabelle 71: Schnellübersicht über Eigenschaften der Punktwolkendarstellung Winteraufnahmen in Faro Scene

| Nr. | Datum      | Baum  | Scan-einstellung    | Gesamt-Scandauer | Punktzahl  | Dateigröße |
|-----|------------|---|---------------------|------------------|------------|------------|
| 1   | 22.03.2017 | Platane groß 1, Feld Baumschule<br>Bad Zwischenahn  | 1/2 Aufl., 3x Qual. | 1h 26 min        | 23.965.032 | 2,33 GB    |
| 2   | 22.03.2017 | Platane klein 1, Feld Baumschule<br>Bad Zwischenahn | 1/2 Aufl., 3x Qual. | 59 min           | 8.602.223  | 1,53 GB    |
| 2   | 22.03.2017 | Platane klein 1, Feld Baumschule<br>Bad Zwischenahn | 1/4 Aufl., 3x Qual. | 25 min           | 1.749.908  | 523 MB     |

Neben der niedrigeren Gesamt-Scandauer reduzieren sich parallel auch die Punktzahl und Dateigröße.

### 8.1.3 Weiterverarbeitung der Punktwolken

In diesem Unterkapitel werden die zuvor dargestellten Punktwolken einfach gefiltert und mit dem Original verglichen. Anschließend werden diese als Punktwolke visualisiert.

Tabelle 72: *Platane groß Winter, mittlere Scaneinstellung, Filterung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)*



| Baum Nr. 1, Platane groß (mittlere Scaneinstellung)                                |   |
|--|---|
| Ausgangspunktwolke   | 1. Filtervorgang  |
|  |  |
| Punktzahl: 23.965.032  | Punktzahl: 9.211.670  |
|  | Verringerung um 61,56 %   |
|  | Filterzeit: 4 h 53 min  |
| Dateigröße: 251 MB (.pod)  | Dateigröße: 97 MB (.pod)  |

Tabelle 73: *Platane klein Winter, mittlere Scaneinstellung, Filterung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)*

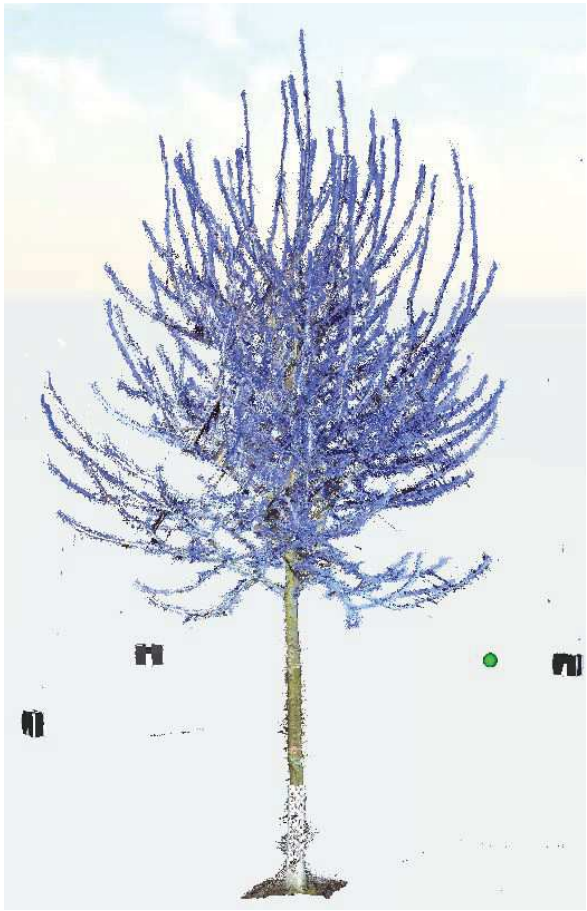
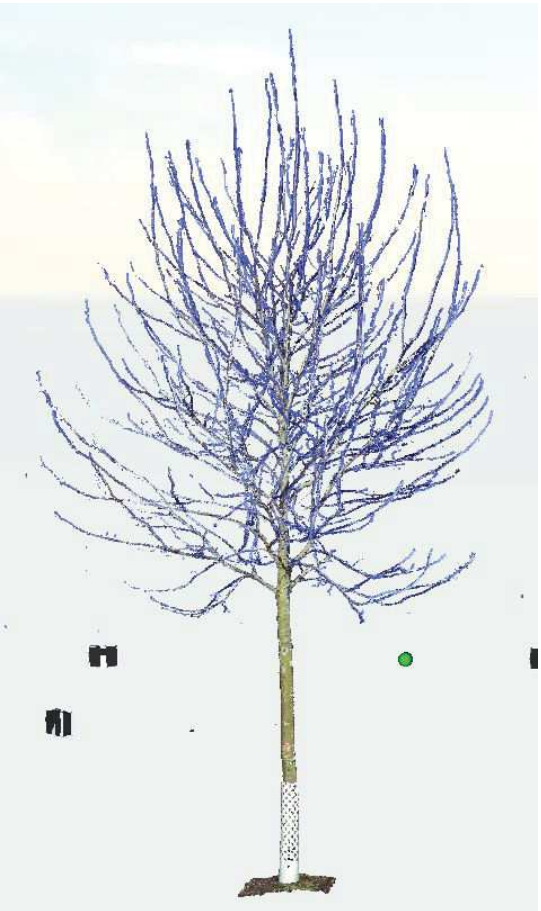
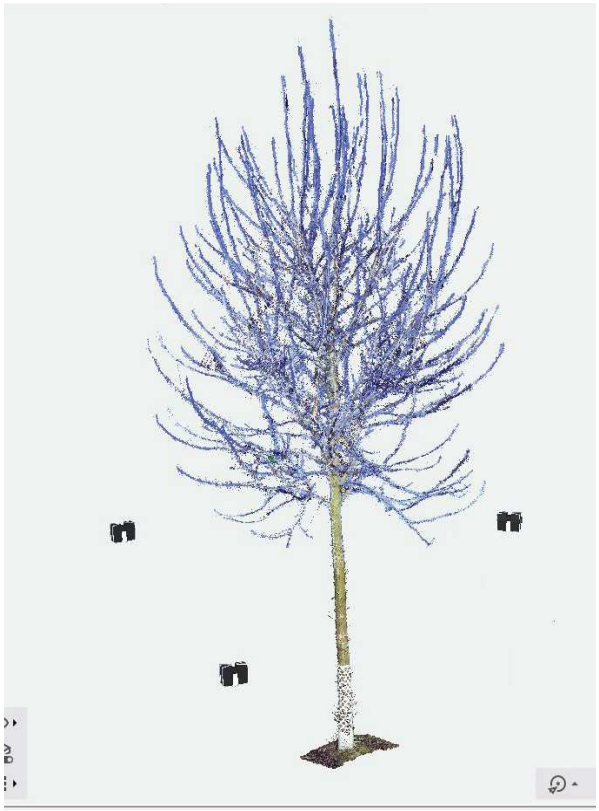

| Baum Nr. 2, Platane klein (mittlere Scaneinstellung)                               |   |
|--|---|
| Ausgangspunktwolke   | 1. Filtervorgang  |
|  |  |
| Punktzahl: 8.602.223   | Punktzahl: 5.389.697  |
|  | Verringerung um 37,35 %   |
|  | Filterzeit: 4 h 8 min   |
| Dateigröße: 90,6 MB (.pod)   | Dateigröße: 56,9 MB (.pod)  |



Tabelle 74: *Platane klein Winter, niedrige Scaneinstellung, Filterung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)*

| Baum Nr. 2, Platane klein (niedrige Scaneinstellung)                               |  |
|--|--|
| Ausgangspunktwolke   | 1. Filtervorgang   |
|  |                       |
| Punktzahl: 1.749.908<br><br>Dateigröße: 28,7 MB (.pod)                             | Punktzahl: 1.226.774<br>Verringerung um 29,9 %<br>Filterzeit: 5 min 52 sek<br>Dateigröße: 20,2 MB (.pod) |

Bei den Filtervorgängen fällt wieder besonders auf, dass die mittleren Scaneinstellungen lange Filterzeiten verursachen. Dementsprechend liegt hier die größte Punktreduzierung und das ersichtlichste Filterergebnis vor.

Für die Visualisierung der Punktwolken in 3ds Max Design müssen die .fls-Dateien wieder in .rcp-Dateien und anschließend in .rcs-Dateien exportiert werden. Hierfür fallen folgende Zeitaufwendungen an:

Tabelle 75: fls-Export in .rcp-Datei bei den Winteraufnahmen (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

| Scanobjekt   | Ausgangs-Datei | Größe   | Dauer Impo. | Export-Datei | Dauer Expo.       | Größe   | Dauer Gesamtzeit  |
|--|----------------|---------|-------------|--------------|-------------------|---------|-------------------|
| Platane groß, un-belaubt, mittlere Einstellung (1x gefiltert)  | .Isproj        | 2,89 GB | 15 sek      | .rcp         | 1 h 20 min 30 sek | 1,56 GB | 1 h 20 min 45 sek |
| Platane klein, un-belaubt, mittlere Einstellung (1x gefiltert) | .Isproj        | 1,65 GB | 15 sek      | .rcp         | 1 h 12 min 16 sek | 990 MB  | 1 h 12 min 31 sek |
| Platane klein, un-belaubt, niedrige Einstellung (1x gefiltert) | .Isproj        | 669 MB  | 15 sek      | .rcp         | 9 min 45 sek      | 306 MB  | 10 min            |

Tabelle 76: .rcp-Export in .rcs-Datei bei den Winteraufnahmen (AUTODESK RECAP360, Version 4.2.0.2)

| Scanobjekt   | Ausgangs-datei | Größe   | Export-Datei | Dauer Export | Größe   | Dauer ges. (.fls -> .rcs) |
|--|----------------|---------|--------------|--------------|---------|---------------------------|
| Platane groß, un-belaubt, mittlere Einstellung (1x gefiltert)  | .rcp           | 1,56 GB | .rcs         | 1 min        | 62 MB   | 1 h 21 min 45 sek         |
| Platane klein, un-belaubt, mittlere Einstellung (1x gefiltert) | .rcp           | 990 MB  | .rcs         | 45 sek       | 21,9 MB | 1 h 13 min 16 sek         |
| Platane klein, un-belaubt, niedrige Einstellung (1x gefiltert) | .rcp           | 306 MB  | .rcs         | 3 sek        | 4,57 MB | 10 min 3 sek              |



Für den Vray-Renderer wurden wie bei den Probeaufnahmen folgende Einstellungen getroffen  
(VISUAL DYNAMICS ® LLC 2017):

- Standardeinstellung Vray Quick Settings
- Auflösung 800 x 600

*Tabelle 77: Punktwolkenvisualisierung Platane groß Winter, 1x gefiltert, mittlere Scaneinstellung in 3ds Max Design (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)*

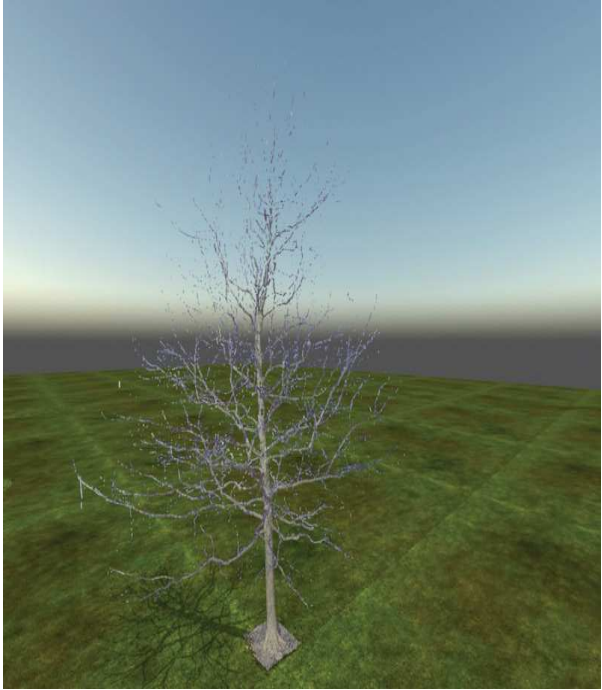
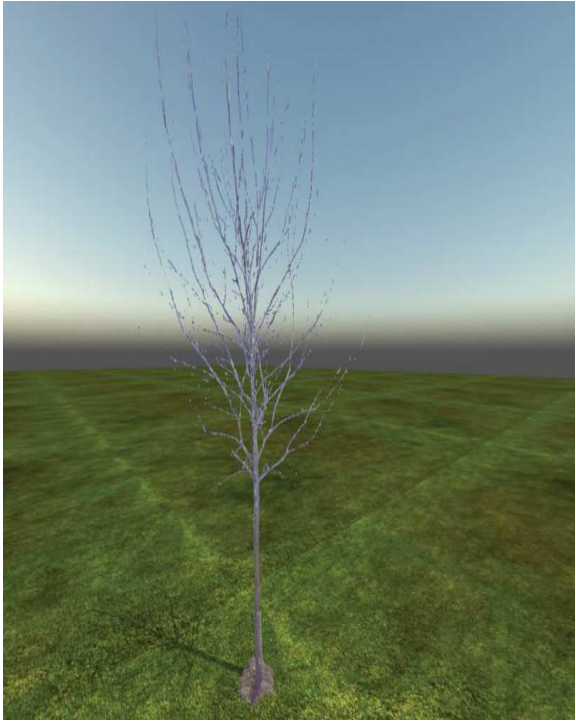

|  |
|--|
| Baum Nr. 1, Platane groß, 1x gefiltert (mittlere Scaneinstellung)                  |
| Punktwolkenvisualisierung  |
|  |
| Punktanzahl: 9.211.670   |
| Renderzeit: 1 min 4sek   |
| Dateigröße: 62 MB (.rcs)   |

Tabelle 78: Punktwolkenvisualisierung Platane klein Winter, links 1x gefiltert, mittlere Scaneinstellung, rechts 1x gefiltert, niedrige Scaneinstellung in 3ds Max Design (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)

| Baum Nr. 2, Platane klein, 1x gefiltert (mittlere Scaneinstellung)                 | Baum Nr. 2, Platane klein, 1x gefiltert (niedrige Scaneinstellung)                  |
|--|---|
| Punktwolkenvisualisierung  |   |
|  |  |
| Punktzahl: 5.389.697<br>Renderzeit: 1 min 20 sek<br>Dateigröße: 21,9 MB (.rcs)     | Punktzahl: 1.226.774<br>Renderzeit: 1 min 2sek<br>Dateigröße: 4,57 MB (.rcs)        |

Wie bereits bei den Probeaufnahmen festgestellt, weichen die Renderzeiten unabhängig von der Punktzahl und Dateigröße kaum ab.

## 8.2 Durchführung Sommeraufnahmen

Die Sommeraufnahmen wurden wieder auf dem Baumschulgelände in Bad Zwischenahn am 15.06.2017 durchgeführt. Wie in Unterkapitel 7.3 festgelegt wird unter folgenden Rahmenbedingungen aufgenommen und weiterverarbeitet:

- Aufnahme der kleineren Gehölze in niedriger und mittlerer Scaneinstellung
- Aufnahme der großen Gehölze in mittlerer Scaneinstellung
- Punktwolkendarstellung in Faro Scene als .fls-Direktimport
- keine Filterung
- Punktwolkenvisualisierung mit 3ds Max Design.

### 8.2.1 Bestandsaufnahme

Ziel war es zunächst, wie in der allgemeinen Vorgehensweise (Methodik) in 5.1 beschrieben, die Gehölze aus den Winteraufnahmen im belauten Zustand aufzunehmen. Nach den Winteraufnahmen konnte jedoch aus verkaufs- und kundentechnischen Gründen nicht garantiert werden, dass genau diese Gehölze drei Monate später noch zur Verfügung stehen. Am Tage der Sommeraufnahme musste festgestellt werden, dass sowohl die große Platane als auch die kleine Platane verkauft worden sind.



Abbildung 68: Vergleich der Baumschulfelder, große Platane an der Straße „Grüne Linie“ (links: März, rechts Juni)



Folglich konnte dieselbe Platane zum direkten Vergleich nicht noch einmal aufgenommen werden. Stattdessen wurde eine neue Platane ausgesucht, die in den Merkmalen Alter, Höhe, Stamm- und Kronendurchmesser Ähnlichkeiten aufweist. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Standort der neu aufgenommenen großen Platane im belaubten Zustand.

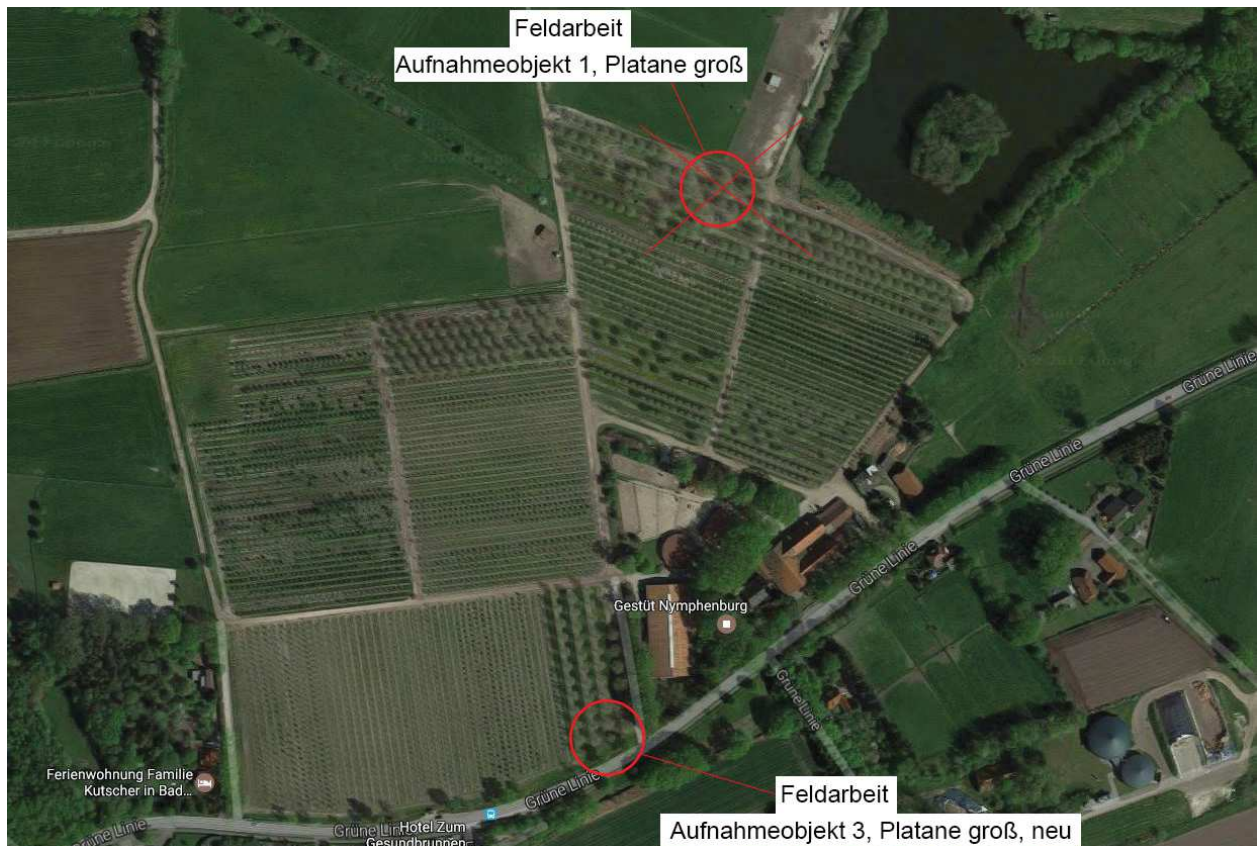


Abbildung 69: Untersuchungsgebiet 2, große Platane (Kartenauszug aus AEROWEST, KARTENDATEN 2017, GEOBASIS-DE/BKG 2017, GOOGLE 2009, 53°13'16.1"N 8°01'33.0"E).



Abbildung 70: Aufnahmeobjekt 3, Platane groß

Die neu aufgenommene Platane weist folgende Merkmale auf:

- *Platanus acerifolia*, 7xv
- Höhe: ca. 15-20 m
- Kronen-Durchmesser: ca. 11 m
- Stammumfang: 1,00 m
- Alter: 30-35 Jahre
- Oberflächenbeschaffenheit/Rinde: plattig



Die kleine Platane war, wie oben angemerkt, zum Termin der Sommeraufnahmen auch nichtmehr vorhanden. Hier wird direkt die nächste Platane innerhalb der Baumreihe ausgewählt, da die Platanen in diesem Baumschulquartier alle die gleiche Größe und Qualität besitzen. Wuchsdifferenzen sind in diesem Altersstadium nur marginal.



Abbildung 71: Untersuchungsgebiet 3, kleine Platane (Kartenauszug aus AEROWEST, KARTENDATEN 2017, GEOBASIS-DE/BKG 2017, GOOGLE 2009, 53°14'26.1"N 7°59'14.0"E).



Abbildung 72: Aufnahmeobjekt 4, Platane klein

Die aufgenommene Platane weist folgende Merkmale auf:

- Platanus acerifolia, 3xv
- Höhe: ca. 6-8 m
- Kronen-Durchmesser: ca. 3,70 m
- Stammumfang: 0,315 m
- Alter: 12-15 Jahre
- Oberflächenbeschaffenheit/Rinde: plattig

Alle weiteren Einzelheiten zu den Sommeraufnahmen sowie Bilder und Standortskizze sind den Anlagen (ab 3.4 Vermessungs-Protokoll vom 15.06.2017, Aufnahme gr. Platane, belaubt, in mittlerer Scaneinstellung, S. 82ff.) zu entnehmen.





Tabelle 79 zeigt die aufgenommenen Bäume mit zugehöriger Qualität, Anzahl der Standpunkte und Gesamtscandauer im Überblick.

Tabelle 79: Schnellübersicht Sommeraufnahmen

| Nr. | Datum      | Baum  | Veg.-Per. | Scan-einstellung    | Anzahl Standpkt. | Gesamt-Scandauer |
|-----|------------|---|-----------|---------------------|------------------|------------------|
| 3   | 15.06.2017 | Platane groß 2, Feld Baumschule<br>Bad Zwischenahn  | belaubt   | 1/2 Aufl., 3x Qual. | 4                | 1h 27 min        |
| 4   | 15.06.2017 | Platane klein 2, Feld Baumschule<br>Bad Zwischenahn | belaubt   | 1/2 Aufl., 3x Qual. | 3                | 1h 2 min         |
| 4   | 15.06.2017 | Platane klein 2, Feld Baumschule<br>Bad Zwischenahn | belaubt   | 1/4 Aufl., 3x Qual. | 3                | 30 min           |

### 8.2.2 Auslesung und Darstellung der Punktwolken

Tabelle 80: .fls-Direktimport Platane groß Sommer, mittlere Scaneinstellung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

| Baum Nr. 3, Platane groß (mittlere Scaneinstellung)                                |  |
|--|--|
| Bild   | Punktwolke   |
|  |                               |
|  | Punktzahl: 54.593.278<br>Dateiformat: .fls<br>Dateigröße: 3,11 GB<br>Punktwolkenimport/-erstellung: 4 min 35 sek |

## 8 Durchführung und Ergebnisse der Hauptaufnahmen

Tabelle 81: .fls-Direktimport Platane klein Sommer, mittlere Scaneinstellung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)



| Baum Nr. 4, Platane klein (mittlere Scaneinstellung)                               |   |
|--|---|
| Bild   | Punktwolke  |
|  |    |
|  | <p>Punktzahl: 29.931.940</p> <p>Dateiformat: .fls</p> <p>Dateigröße: 2,08 GB</p> <p>Punktwolkenimport/-erstellung: 3 min 19 sek</p> |



Tabelle 82: .fls-Direktimport Platane klein Sommer, niedrige Scaneinstellung in Faro Scene (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)


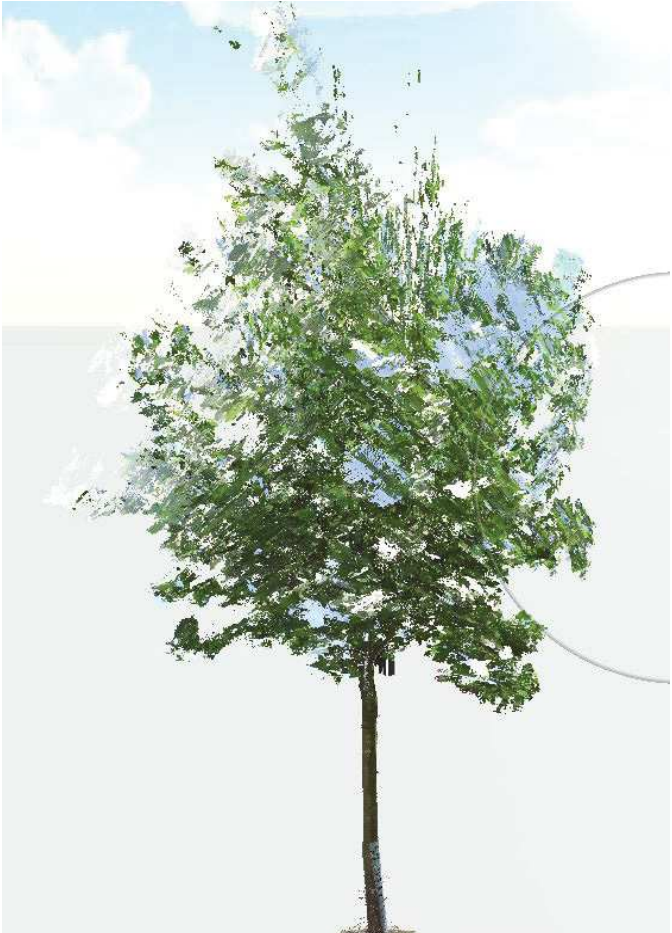
| Baum Nr. 4, Platane klein (niedrige Scaneinstellung)                               |   |
|--|---|
| Bild   | Punktwolke  |
|  |                      |
|  | Punktzahl: 6.711.890<br>Dateiformat: .fls<br>Dateigröße: 658 MB<br>Punktwolkenimport/-erstellung: 1 min |

Tabelle 83: Schnellübersicht über Eigenschaften der Punktwolkendarstellung Sommeraufnahmen in Faro Scene

| Nr. | Datum      | Baum  | Scan-einstellung    | Anzahl Standpkt. | Gesamt-Scandauer | Punktzahl  | Dateigröße |
|-----|------------|---|---------------------|------------------|------------------|------------|------------|
| 3   | 15.06.2017 | Platane groß 2, Feld Baumschule<br>Bad Zwischenahn  | 1/2 Aufl., 3x Qual. | 4                | 1h 27 min        | 54.593.278 | 3,11 GB    |
| 4   | 15.06.2017 | Platane klein 2, Feld Baumschule<br>Bad Zwischenahn | 1/2 Aufl., 3x Qual. | 3                | 1h 2 min         | 29.931.940 | 2,08 GB    |
| 4   | 15.06.2017 | Platane klein 2, Feld Baumschule<br>Bad Zwischenahn | 1/4 Aufl., 3x Qual. | 3                | 30 min           | 6.711.890  | 658 MB     |

Auch bei den Sommeraufnahmen stellen sich die gleichen Merkmale hinsichtlich Gesamt-Scandauer-, Punktzahl- und Dateigrößenreduzierung heraus. Entsprechend der Reduzierung der Scaneinstellung sinken diese.

### 8.2.3 Weiterverarbeitung der Punktwolken

Aufgrund des Ausschlusses einer Filterung der Aufnahmen im belauteten Zustand folgt in diesem Unterkapitel direkt die Punktwolkenvisualisierung in 3ds Max Design. Hierbei fallen folgende Exportzeiten an:

Tabelle 84: fls-Export in .rcp-Datei bei den Sommeraufnahmen (FARO SCENE, Version 6.2.4.30)

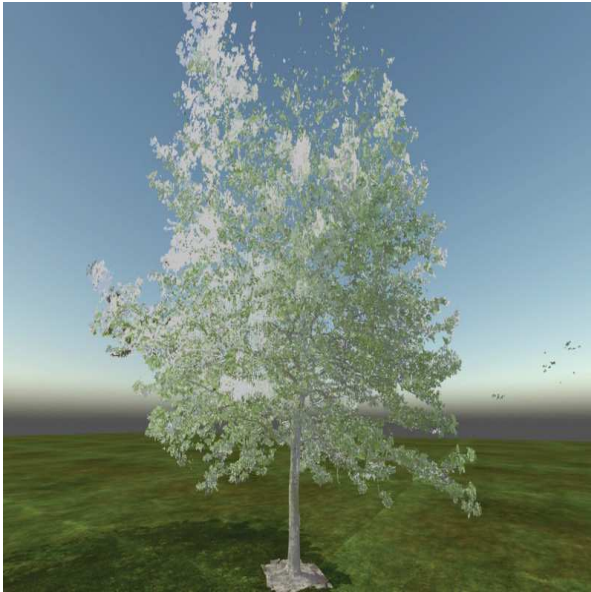
| Scanobjekt  | Ausgangs-Datei | Größe   | Dauer Impo.  | Export-Datei | Dauer Expo.   | Größe   | Dauer Gesamtzeit  |
|---|----------------|---------|--------------|--------------|---------------|---------|-------------------|
| Platane groß, belautet, mittlere Einstellung (ungefiltert)  | .fls           | 3,11 GB | 4 min 35 sek | .rcp         | 1 h 8 min     | 2,2 GB  | 1 h 12 min 35 sek |
| Platane klein, belautet, mittlere Einstellung (ungefiltert) | .fls           | 2,08 GB | 3 min 19 sek | .rcp         | 48 min 12 sek | 1,21 GB | 51 min 31 sek     |
| Platane klein, belautet, niedrige Einstellung (ungefiltert) | .fls           | 658 MB  | 1 min        | .rcp         | 18 min 45 sek | 825 MB  | 19 min 45 sek     |

Tabelle 85: .rcp-Export in .rcs-Datei bei den Sommeraufnahmen (AUTODESK RECAP360, Version 4.2.0.2)

| Scanobjekt  | Ausgangs-datei | Größe   | Export-Datei | Dauer Export | Größe   | Dauer ges. (.fls -> .rcs) |
|---|----------------|---------|--------------|--------------|---------|---------------------------|
| Platane groß, belautet, mittlere Einstellung (ungefiltert)  | .rcp           | 2,2 GB  | .rcs         | 44 sek       | 387 MB  | 1 h 13 min 19 sek         |
| Platane klein, belautet, mittlere Einstellung (ungefiltert) | .rcp           | 1,21 GB | .rcs         | 11 sek       | 78,9 MB | 51 min 42 sek             |
| Platane klein, belautet, niedrige Einstellung (ungefiltert) | .rcp           | 825 MB  | .rcs         | 1 min        | 68,6 MB | 20 min 45 sek             |



Gerenderte Ergebnisse in 3ds Max Design zeigen die nachfolgenden Abbildungen.

*Tabelle 86: Punktwolkenvisualisierung Platane groß Sommer, ungefiltert, mittlere Scaneinstellung in 3ds Max Design (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)*

|  |
|--|
| Baum Nr. 3, Platane groß, ungefiltert (mittlere Scaneinstellung)                   |
| Punktwolkenvisualisierung  |
|  |
| Punktanzahl: 54.593.278  |
| Renderzeit: 1 min 20 sek   |
| Dateigröße: 387 MB (.rcs)  |



*Tabelle 87: Punktwolkenvisualisierung Platane klein Sommer, links ungefiltert, mittlere Scaneinstellung, rechts ungefiltert, niedrige Scaneinstellung in 3ds Max Design (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015)*

| Baum Nr. 4, Platane klein, ungefiltert (mittlere Scaneinstellung)                  | Baum Nr. 4, Platane klein, ungefiltert (niedrige Scaneinstellung)                   |
|--|---|
| Punktwolkenvisualisierung  |   |
|  |  |
| Punktzahl: 29.931.940<br>Renderzeit: 1 min 13 sek<br>Dateigröße: 78,9 MB (.rcs)    | Punktzahl: 6.711.890<br>Renderzeit: 1 min 39 sek<br>Dateigröße: 68,6 MB (.rcs)      |

### 8.3 Ergebnisse der Hauptaufnahmen

Mit einer Baumhöhe von 15-20 m und einem Kronendurchmesser von 9 bzw. 11 m weist die große Platane eine weitere Größenordnung auf und liegt mit diesen Dimensionen deutlich über der bisher untersuchten Eiche aus den Probeaufnahmen. Dementsprechend werden hieraus neue Erkenntnisse generiert. Die kleine Platane liegt mit einer Baumhöhe von 6-8 m und einem Kronendurchmesser von ca. 3,50 m unterhalb der Dimension aus den Probeaufnahmen. Aus diesem Grund wird für die Aufnahme der kleinen Platane die Standpunktzahl von 4 auf 3 reduziert. Hierdurch wird die Aufnahmezeit und darauf aufbauend die Weiterverarbeitungszeit verkürzt.

Im Zuge der Winteraufnahme weist die eingeleseene Punktwolke der großen Platane nach dem .fls-Import mit fast 24.000.000 Punkten eine hohe Punktdichte auf (vgl. Tabelle 2). Aufgrund von Windgeschwindigkeiten bis 2,7 m/s (vgl. Anhang, 3.1 Vermessungs-Protokoll vom 22.03.2017, Aufnahme gr. Platane, unbelaubt, in mittlerer Scaneinstellung, S.72 ff.) während der Aufnahme in Kombination mit einer längeren Ausrichtungszeit des Lasers auf einen Punkt infolge der mittleren Scaneinstellung entsteht ein hohes Messrauschen, welches durch die blau gekennzeichneten Punkte heraussticht. Diese Punkte werden in blau dargestellt, weil der Messstrahl bei einer Astschwingung gleichzeitig Farbinformationen von dem Ast selbst und der dahinterliegenden Umgebung aufnimmt. Bei den Winterprobeaufnahmen wurden sogar Windgeschwindigkeiten bis 4,5 m/s gemessen. Hier ist das Messrauschergebnis noch stärker zu verzeichnen (vgl. Unterkapitel 6.1). Auf Basis der hohen Punktzahl wird eine .fls-Dateigröße von 2,33 GB erzielt. Der Import in Faro Scene dauert 4 min 26 sek und liegt im vertretbaren Bereich. Durch die einfache Filterung wird eine deutliche Punktreduzierung (über 60 %) bezweckt (vgl. Tabelle 6). Hierdurch wird eine hohe und vorallem deutlich sichtbare Messrauschreduzierung erreicht, ohne dass relevante Messpunkte entfernt werden. Demgegenüber steht eine lange Filterzeit, die mit fast 5 h die längste Bearbeitungszeit mit sich zieht. Die Notwendigkeit des Filtervorgangs ist allerdings zur realistischen Darstellung und Erzielung eines möglichst hohen Detailgrades sowie einer Datenreduzierung gegeben. Im weiteren Bearbeitungsverlauf wirkt sich die erzielte Datenreduzierung zusätzlich positiv aus. Ein zweiter Filtervorgang ist auszuschließen, da hierdurch eine zu starke Reduzierung im Astspitzenbereich vorliegt (vgl. Erkenntnisse aus Probeaufnahmen, Unterkapitel 6.2). Dennoch bringt die Dateigröße weitere hohe Bearbeitungszeiten im Bereich des Exportes in eine .rcp-Datei zur Visualisierung mit sich. Mit der Erstellung der finalen .rcs-Datei wird eine Dateigröße von 62 MB erreicht. Im Vergleich zu Modellen aus Gehölzdatenbanken (vgl. Unterkapitel 7.4) gilt dies als vertretbar. Das in 3ds Max Design gerenderte Echtzeit-Modell weist durch die vollzogenen Bearbeitungsschritte klare Strukturen auf, in denen Details, Habitusform, Verzweigungsstruktur, Farbwerte und Schatten übernommen werden. Als wichtige Faktoren für die menschliche Wahrnehmung fördert dies die Wiedererkennung. Wie bei den Probeaufnahmen ist die Renderzeit im Vergleich zu Modellen aus Gehölzdatenbanken als gering einzustufen. Die Gesamtbearbeitungszeit von der Aufnahme bis zum fertig visualisierten Echtzeit-Modell beläuft sich auf rund 7 h 46 min (vgl. Anhang, 4.4 Punktwolkenvisualisierung der Hauptaufnahmen, Winter, S. 95) und stellt gleichzeitig die längste Bearbeitungsdauer dar. Das Verhältnis von Aufnahme- zu Weiterverarbeitungszeit liegt bei 1:4,4 und somit unterhalb der in der Literatur genannten Richtwerte (MARBS 2003, S.7).

Nach dem Einlesen der .fls-Datei der beiden unterschiedlichen Scaneinstellungen der kleinen Platane wird bei der mittleren Scaneinstellung eine fast fünffach höhere Punktzahl erreicht. Die Windverhältnisse sind mit max. 2,2 m/s vergleichbar mit der Aufnahme der großen Platane. Damit zusammenhängende Auswirkungen des Messrauschens in Bezug auf die gewählte Scaneinstellung werden auch bei den Aufnahmen der kleinen Platane ersichtlich. Der Anteil der Messrauschfehler bei der mittleren Scaneinstellung ist deutlich höher als bei der niedrigen Scaneinstellung. Importzeiten in Faro Scene sind mit 42 sek bzw. 3 min 15 sek vertretbar. Unter Anwendung des ersten Filtervorgangs wird bei der mittleren Scaneinstellung mit rund 37 % eine höhere Messrauschreduzierung erreicht. Bei der niedrigen Scaneinstellung liegt die Reduzierung bei knapp 30 %. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass die Ausgangsdatei der niedrigen Scaneinstellung von Beginn an ein geringeres Messrauschen aufweist. Die Filterzeit der mittleren Scaneinstellung ist mit 4 h 8 min deutlich höher als bei der niedrigen Einstellung mit 5 min 52 sek. Vergleicht man die Filterzeiten der beiden mittleren Scaneinstellung der großen und kleinen Platane, verändert sich die Filterzeit im Verhältnis zur Punktzahl und Dateigröße nur geringfügig. Bei einer dreifach geringeren Punktzahl verringert sich die Filterzeit nicht mal um 20 %. Ausgehend von den unterschiedlichen Dateigrößen der Scaneinstellungen variieren auch die Exportzeiten in eine .rcp-Datei. Auch hier wird deutlich, dass der Zeitunterschied zwischen der großen und kleinen Platane bei mittlerer Scaneinstellung gering ist. Die für die Visualisierung notwendigen .rcs-Dateien sind mit 21,9 MB bzw. 4,57 MB als anwendungstauglich einzustufen. Die erzielten Echtzeit-Modelle, dargestellt in 3ds Max Design als gerenderte Punktwolkenvisualisierung, lassen im Direktvergleich der beiden Scaneinstellungen keine visuellen Unterschiede erkennen. Aus diesem Grund ist für die kleine Platane in Bezug auf die deutlich geringere Scandauer, Dateigröße, Importzeit in Faro Scene, Filterung und Exportzeit in eine .rcp-Datei die niedrige Scaneinstellung für die Winteraufnahmen als völlig ausreichend einzustufen. Verstärkt wird diese Festlegung aus den Erkenntnissen der Probeaufnahmen aus 6.3 sowie durch die Tatsache, dass die Gesamtbearbeitungsdauer von der Aufnahme bis zum visualisierten Modell statt 6 h 25 min nur 43 min beträgt (vgl. Anhang, 4.4 Punktwolkenvisualisierung der Hauptaufnahmen, Winter, S. 95).

Auch bei den Sommeraufnahmen ergeben sich aufgrund der beschriebenen Baumdimension der großen Platane neue Erkenntnisse. Mit rund 54.500.000 Punkten und einer .fls-Dateigröße von 3,11 GB wird die zusätzliche Auswirkung des Blattwerkes sowie weiteren Farbinformationen deutlich. Hier wird bei gleicher Scaneinstellung zur Winteraufnahme der großen Platane mehr als die doppelte Punktzahl erfasst. Mit 4 min 35 sek liegt die Importzeit in Faro Scene im Verhältnis zu

den restlichen Aufnahmen. Betrachtet man die importierte .fls- Datei in Faro Scene (vgl. Tabelle 14) wird deutlich, dass eine detaillierte Einzelblatterkennung schwer möglich ist. Dies ist auf die Windgeschwindigkeit von max. 1,8 m/s (vgl. Anhang, 3.4 Vermessungs-Protokoll vom 15.06.2017, Aufnahme gr. Platane, belaubt, in mittlerer Scaneinstellung, S.82ff.) zurückzuführen. Im Verhältnis zu den Winteraufnahmen ist die gemessene Windgeschwindigkeit als niedrig einzustufen. Jedoch bieten die zahlreichen Blattflächen eine große Windangriffsfläche, wodurch niedrigere Windgeschwindigkeiten größere Auswirkungen auf das Messergebnis haben können. In diesem Fall werden die Messrauschpunkte nicht wie bei den Winteraufnahmen als blaue Punkte dargestellt, da der Messstrahl bei Blatt- und Astbewegungen auf das nächstgelegene Blatt oder den dahinterliegenden Ast trifft und dessen Farb- und Geometrieinformation aufnimmt. Im Ergebnis der belaubten Probeaufnahme ist die Einzelblattstruktur bei vergleichbaren Windeinflüssen deutlicher zu erkennen. Dies liegt daran, dass Eichen kleinere Blätter besitzen und dem Wind weniger Angriffsfläche bieten. Neben den beschriebenen Windeinflüssen fällt weiterhin auf, dass erhebliche Aufnahmeverluste im oberen Kronenspitzenbereich auftreten. Diese Verluste sind auf das große Kronenvolumen und die pyramidenförmige Wuchsform zu schließen, da hierdurch der obere Kronenbereich abgeschattet und durch den Aufnahmebereich des Scanners nur begrenzt erreicht wird. Um dieser Problematik entgegenzuwirken besteht die Option die Distanz zwischen Scanner und Aufnahmeobjekt zu vergrößern oder eine zweite Scanebene mit einem zusätzlichen Scannerstandpunkt in größerer Höhe einzurichten. Bei 4 Gerätestandpunkten wären dies mit zweiter Scanebene insgesamt 8 Standpunkte, was eine doppelte Messdauer und damit verbundene längere Bearbeitungszeit mit sich bringen würde. Nachteil der Distanzerhöhung zwischen Gerät und Aufnahmeobjekt ist wiederum, dass die Messgenauigkeit abnimmt und durch den längeren Messweg die Empfindlichkeit auf Bewegungen zunimmt.

Die Erstellung der .rcp-Datei erfordert einen Zeitaufwand von 1 h 12 min und ist vergleichbar mit den Aufwendungen für die Winteraufnahmen. Nicht vergleichbar ist die generierte .rcs-Dateigröße, die mit 387 MB auch im Vergleich zu Modellen aus Gehölzdatenbanken größer ausfällt. Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Darstellungseinschränkungen erzielt das in 3ds Max Design gerenderte Punktwolkenmodell insbesondere Wiedererkennungswerte in der Darstellung der Habitusform. Auch vereinzelte Äste innerhalb der Laubkrone sind erkennbar (vgl. Tabelle 20). Farbwerte werden im Arbeitsbereich korrekt dargestellt und durch den Vray Render leicht verfälscht. Weiterhin wird der Schatten realgetreu simuliert. Wie bei den anderen Aufnahmen liegt die Renderzeit unterhalb der Renderzeitaufwendung für Modelle aus Gehölzdatenbanken. Die Gesamtbearbeitungszeit

von der Aufnahme bis zum visualisierten Modell liegt bei rund 2 h 47 min (vgl. Anhang, 4.5 Punktwolkenvisualisierung der Hauptaufnahmen, Sommer, S.96).

Bei der Sommeraufnahme der kleinen Platane in mittlerer und niedriger Scaneinstellung lässt sich festhalten, dass auch hier eine deutlich höhere Punktzahl mit der mittleren Scaneinstellung (knapp 30.000.000) erfasst wird. Demgegenüber werden mit der niedrigen Einstellung nur rund 6.700.000 Punkte aufgenommen. Die Dateigröße und Importzeit in Faro Scene stehen im Verhältnis zur aufgenommenen Punktzahl und den zuvor durchgeführten Aufnahmen. Wie bei den Sommeraufnahmen der großen Platane sind die Windauswirkungen auf die Blattdarstellung in der Punktwolke noch deutlicher erkennbar, da im Aufnahmezeitraum stärkere Windgeschwindigkeiten bis 3,4 m/s vorhanden waren. Im Detail ist ersichtlich, dass bei der mittleren Scaneinstellung die Kronenspitze vollständiger ausgebildet wird und vereinzelte Blattumrisse besser dargestellt sind. Gegenüber der unbelaubten Aufnahme verhält sich die Differenz zwischen den zwei Scaneinstellungen bei der .rcp-Exportzeit geringer. Hier beträgt der Zeitunterschied von der mittleren zur niedrigen Scaneinstellung ca. 36 min im Vergleich zu ca. 60 min bei den Winteraufnahmen. Anschließend generierte .rcs-Dateien der beiden Scaneinstellungen (78,9 MB und 68,6 MB) unterscheiden sich um nur 10,3 MB. Mit dieser Dateigröße sind die .rcs-Dateien als vertretbar einzustufen und mit anderen Baummodellen vergleichbar. Das gerenderte Echtzeit-Modell in 3ds Max Design verstärkt die zuvor festgestellten Erkenntnisse. Im Modell der niedrigen Scaneinstellung sind deutlich mehr Lücken im Astspitzenbereich. Farbwerte, Schatten, Blattdarstellungen und Renderzeiten weisen dieselben Merkmale wie bei der großen Platane auf. Auf Basis der lückenhaften Darstellung bei der niedrigen Scaneinstellung und der sich verhältnismäßig gering veränderten Mehrzeitaufwendung für den .rcp-Export wird die mittlere Scaneinstellung als geeigneter eingestuft. Bei einer Gegenüberstellung der Gesamtbearbeitungszeit von der Aufnahme bis zum visualisierten Modell (vgl. Anhang, 4.5 Punktwolkenvisualisierung der Hauptaufnahmen, Sommer, S.96) beträgt diese knapp 1 h 58 min statt 53 min. Trotz doppelter Zeitaufwendung, die durch die erhöhte Scaneinstellung entsteht, ist die aufzubringende Zusatzzeit aufgrund des verhältnismäßigen Zeitrahmens zu den anderen Aufnahmen und der im Ergebnis höher erzielten Detailschärfe akzeptabel.



Schlussfolgernd ist festzuhalten, dass die für die Winteraufnahme der großen Platane gewählte Scaneinstellung und Weiterverarbeitungsweise für eine Echtzeit-Punktwolkenvisualisierung ziel-führende Ergebnisse liefern. Für die Darstellung der kleinen Platane im unbelaubten Zustand ist die Aufnahme mit niedriger Scaneinstellung ausreichend, während für die belaubte Aufnahme dieser Gehölzgröße wiederum die mittlere Scaneinstellung zu bevorzugen ist. Um bei der belaubten Aufnahme der großen Platane aussagekräftige Ergebnisse zu erlangen, sind Optimierungen im Bereich der Standpunktplanung notwendig. Einen Eindruck für mögliche Einsatzgebiete der erzielten Echtzeit-Punktwolkenmodelle liefern die nachfolgenden Abbildungen, unter Anwendung des Vray-Renderers (VISUAL DYNAMICS ® LLC 2017):



*Abbildung 73: Renderszene 1 mit Platane groß, unbelaubt, mittlere Scaneinstellung (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016)*



Abbildung 74: Renderszene 2 mit Platane klein, unbelaubt, niedrige Scaneinstellung (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016)



Abbildung 75: Renderszene 3 mit Platane groß, belaubt, mittlere Scaneinstellung (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016)





Abbildung 76: Renderszene 4 mit Platane klein, belaubt, mittlere Scaneinstellung (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016)



Abbildung 77: Renderszene 5 mit Platane groß, unbelaubt, mittlere Scaneinstellung (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016)



Abbildung 78: Renderszene 6 mit Platane groß, belaubt, mittlere Scaneinstellung (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016)



Abbildung 79: Renderszene 7 mit Platane klein, belaubt, mittlere Scaneinstellung (AUTODESK 3DS MAX DESIGN, Version 2015; PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION 2016)



Wie die oben gerenderten Abbildungen zeigen, lassen sich die generierten Echtzeit-Baummodelle in planerische Situationen einbetten und für gezielte Bedürfnisse in Szene setzen. Durch unterschiedliche Perspektiven können Dimensionen, Schattenverläufe, Farbauswirkungen und baumspezifische Vegetationsunterschiede innerhalb der Jahreszeiten einfach darstellen und vermitteln werden. Weiterhin können durch bildhafte Präsentationsmöglichkeiten gegenüber dem Kunden Missverständnisse vorgebeugt werden und eindeutige Qualitätsdefinitionen getroffen werden, da die Baummodelle realgetreu in die virtuelle Planung eingebettet und interaktiv verwendet werden können. Des Weiteren werden Planungsprozesse unterstützt und Planungsfehler vermieden.

Auf Basis der zunehmenden Bedeutung und Entwicklung von Virtual Reality-Technologien, auch speziell für Branchen wie den Garten- und Landschaftsbau, in denen dieser Bereich noch nicht umfassend erschlossen wurde, bietet die Echtzeit-Visualisierung von Gehölzen ein mögliches potentiell Anwendungsfeld.



## 9 Gesamtdiskussion

Mit der Aufführung der Grundlagen über das 3D-Laserscanning und die 3D-Computervisualisierung wird zunächst dargelegt, dass beide Thematiken ein breites Grundlagenspektrum bieten, mit denen man sich vor einer Anwendung auseinandersetzen muss. In Kombination liefern die Themengebiete Potentiale für unterschiedlichste Anwendungen und Branchen. Durch die spezielle Ausrichtung der Arbeit auf die Aufnahme und Visualisierung von Baummodellen wird gezeigt, dass die Darstellung von Echtzeit-Baummodellen in interaktiven Planungsprozessen auch großes Potential für die Branche des Garten- und Landschaftsbaus bietet.

Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass Laserscanner generierte Baumaufnahmen grundsätzlich möglich sind. Durch die Verwendung unterschiedlicher Scaneinstellungen und die Aufnahme verschiedener Baumgrößen ergibt sich ein breites Spektrum an Aufnahmeversuchen. Im Rahmen des zur Verfügung stehenden 3D-Laserscanners und einer Auswahl an auf dem Markt vorhandener Programme und deren Funktionen wird ein von der Aufnahme bis zur Visualisierung optimales Standardverfahren aufgezeigt. Auf Basis der Aufnahmeergebnisse ergibt sich die Erkenntnis, dass in Abhängigkeit von der Baumgröße, Vegetationsperiode, Ergebnisqualität und zu erbringender Zeitaufwendung (Wirtschaftlichkeit) die Scaneinstellung und Standpunktanzahl zu variieren ist. Je höher die Scaneinstellung und die Anzahl der Gerätestandpunkte, desto länger wird die Aufnahme- und Weiterverarbeitungszeit sowie der dazugehörige Datenaufwand. Aus den Aufnahmen ergeben sich folgende Festlegungen:

- niedrige Scaneinstellung (1/4 Auflösung, 3x Qualität) und 3 Gerätestandpunkte bei unbelaubten Kleinbäumen (bis 12,0 m Höhe) ausreichend
- mittlere Scaneinstellung (1/2 Auflösung, 3x Qualität) und 3 Gerätestandpunkte bei belaubten Kleinbäumen notwendig
- mittlere Scaneinstellung (1/2 Auflösung, 3x Qualität) und 4 Gerätestandpunkte bei unbelaubten Großbäumen (über 12,0 m Höhe) ausreichend
- mittlere Scaneinstellung (1/2 Auflösung, 3x Qualität) und 4 Gerätestandpunkte bei belaubten Großbäumen nicht ausreichend.

Mit der Darstellung der Ergebnisse wird ebenfalls gezeigt, dass Windeinflüsse Auswirkungen auf die Aufnahmen haben. Diese fallen in Abhängigkeit von der gewählten Scaneinstellung und der Vegetationsperiode unterschiedlich aus. Wiedergespiegelt werden diese Einflüsse in Form von Messrauschpunkten, welche sich durch Filtervorgänge reduzieren, jedoch nicht komplett entfernen lassen.

Bezugnehmend auf die Programmvielzahl und deren Funktionen ist noch einmal hervorzuheben, dass aus zeitlichen und somit wirtschaftlichen Gründen nur programmautomatisierte Weiterverarbeitungsfunktionen getestet wurden. Des Weiteren wurde aus den genannten Gründen auf eine Kombination einzelner Bearbeitungsschritte in verschiedenen Weiterverarbeitungsprogrammen verzichtet. Bei der Punktfiltrierung liefert Faro Scene die besten Filterergebnisse und Messrauschreduzierung im Rahmen der detaillierten Programmuntersuchung. Keines der getesteten Programme erzielt eine zufriedenstellende Vermaschung der Baummodelle. Aus diesem Grund richtet sich der Fokus auf eine Punktwolkenvisualisierung. Für die unterschiedlichen Baumgrößen und Vegetationsperioden lassen sich folgende Schritte für den optimalen Verfahrensablauf definieren:

- unbelaubte Aufnahmen      → ein Filtervorgang
- belaubte Aufnahme         → kein Filterung.

Neben den optimalen Scanparametern und programmtechnischen Weiterverarbeitungsschritten wird das .rcs-Dateiformat als geeignetes Austauschformat für die Punktwolkenvisualisierung festgelegt. Alle bisher aufgeführten Festlegungen bilden den als Standardverfahren definierten optimalen Verfahrensablauf.

Auf der Grundlage von fehlenden Erkenntnissen im Bereich von Baumaufnahmen mittels terrestrischem Laserscanning für Echtzeit-Visualisierungen erweist sich die angewendete beschreibende und auswertende Methode als sinnvoll. Durch die vorab durchgeführten Probeaufnahmen und Programmuntersuchungen ergaben sich erste Erkenntnisse und darauf aufbauende definierte Qualitätsmerkmale, die im Zuge der Hauptaufnahmen genauer untersucht und bekräftigt wurden. Entgegengesetzt der geplanten Methode konnte für die Hauptdurchführung der Winter- und Sommeraufnahme nicht der gleiche Baum verwendet werden. Folglich war ein Sommer- Wintervergleich an ein und demselben Baum nicht möglich. Weitere Eingrenzungen des möglichen Bearbeitungsbereiches entstanden durch die vorliegenden Rechnerleistungen. Die durch die Scans generier-

ten .fls-Ausgangsdateien sind vor allem bei der mittleren Scaneinstellung so groß, dass enorme Zeitaufwendungen im Bereich der Weiterverarbeitung entstehen. Hinzu kommt eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten durch die unterschiedlichen Programme, die aus zeitlichen Gründen nicht vollumfänglich ausgetestet werden konnten. Eine weitere Eingrenzung der Bearbeitung stellten die Programmverfügbarkeiten dar. Zur Verfügung gestellte Testlizenzen waren hinsichtlich des Nutzungszeitraumes und teilweise auch in den Funktionen eingeschränkt. Darüber hinaus konnten die Baumaufnahmen nur auf wenige Termine beschränkt werden, da der 3D-Laserscanner nur begrenzt zur Verfügung stand. Bei den Aufnahmen selbst hat sich herausgestellt, dass die große Platane im Sommer nicht ganzheitlich erfasst wird. Hier sind insbesondere Verluste im Kronenspitzenbereich zu verzeichnen. Im Rahmen der Weiterverarbeitung der Punktwolken kommen die untersuchten Programme bei der Vermaschung an ihre Grenzen. Wie oben aufgeführt, wurde hier kein zielführendes Ergebnis erreicht. Im Zuge der darauf ausgewählten Punktwolkenvisualisierung ergeben sich weiterhin erhebliche Einschränkungen in der Visualisierung. Hier kann aufgrund der Importmöglichkeiten nur ein Visualisierungsprogramm genutzt werden. In Bezug auf die verwendeten Render- und Szeneneinstellungen ist hinzuzufügen, dass auch hier weitere Einstellungsmöglichkeiten zur Ergebnisverbesserung untersucht werden können.

Betrachtet man die gewonnenen Erkenntnisse und die dargelegten Grenzen, bleibt vor allem eine erfolgreiche Aufnahme von belaubten Großgehölzen offen. Hier besteht die Möglichkeit, die fehlenden Punkte im Kronenspitzenbereich durch zusätzliche Scannerstandpunkte in größerer Höhe aufzunehmen. Alternativ kann durch eine Erhöhung der Scannerentfernung zum Objekt ein größerer Aufnahmebereich gewonnen werden. Die Möglichkeit, größere Gehölze auch mit niedrigerer oder höherer Scaneinstellungen zu erfassen wurde im Zuge der Bearbeitung ausgeschlossen, kann dennoch überprüft werden. Erzielte Ergebnisse sind miteinander zu vergleichen.

Auch Punktverluste durch die Wahl einer niedrigen Scaneinstellung, die zu Verlusten von Detailbereichen wie Kronenspitzen und Einzelästen führen, sind in Bezug auf menschliche Wahrnehmung und Wiedererkennung tiefgreifender zu untersuchen. Hier stellt sich die Frage, ab wann ein Mensch Unterschiede im Detailbereich wahrnimmt.

Weiterhin besteht Optimierungsbedarf im Bereich der Messrauschbeseitigung. Besonders durch die abweichende Farbdarstellung der Messrauschpunkte wird die Wiedererkennung des Echtzeit-Mo-

dells eingeschränkt. An diesem Punkt gilt es, präzisere, auf die Beseitigung von Messrauschfehlern programmierte Filteralgorithmen zu finden bzw. zu entwickeln. Alternativ steht dem eine manuelle und zeitaufwendige Anpassung der Einzelpunktfarbe gegenüber. Ebenso ist eine Kombination einzelner Bearbeitungsschritte in mehreren Weiterverarbeitungsprogrammen denkbar.

Da eine Vermaschung der Baummodelle nicht zielführend vollzogen werden konnte, besteht auch hier Untersuchungsbedarf. Generell ist die Erzielung einer höheren Detailschärfe durch eine zusätzliche manuelle Bearbeitung der Punktwolke oder des vermaschten Objektes wahrscheinlich, jedoch ist hier von deutlich höheren Zeitaufwendungen auszugehen. Auch dieser Ansatz kann genauer untersucht werden.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, mit den durch die Vermaschung generierten .obj-Dateien eine bessere Ausgangsgröße zu schaffen, welche in mehreren Visualisierungsprogrammen zur Verfügung steht. Allerdings muss hierzu ein vertretbares Vermaschungsergebnis erzielt werden und die Übernahme von Farbwerten garantiert werden. Für Untersuchungen und Bearbeitungen in weiteren Programmen können die generierten unterschiedlichen Punktwolkenformate weiter verwendet werden.

Über die reine planungstechnische Verwendung der generierten Echtzeit-Baummodelle hinaus besteht eine Vielzahl von Weiterverwendungsmöglichkeiten. Diese können beispielsweise für forschungstechnische Zwecke verwendet werden. Hier besteht die Option, Baumentwicklungen kontinuierlich über Jahrzehnte in verschiedenen Vegetationsperioden aufzuzeichnen und zu untersuchen, um hieraus entwicklungsbedingte Parameter zu gewinnen. Weiterhin lassen sich Rückschlüsse über entsprechende Standorteigenschaften schließen. Die Erkenntnisse können wiederum mit computergenerierten Wachstumsgeneratoren verknüpft und verglichen werden. Auch diese Rückschlüsse lassen sich in Planungsprozesse einbetten und zeit- und entwicklungsabhängig darstellen und visualisieren. Darüber hinaus können hinsichtlich des Entwicklungsprozesses krankheitsbedingte Symptome und Entwicklungsschwächen überwacht und Präventionsmaßnahmen abgeleitet werden. Ebenfalls ist die Thematik Wuchsverhalten in Bezug auf Boden- und Umweltverhältnisse gezielt untersuchbar. Die Anwendung in Schulungsmaßnahmen ist ein weiteres Einsatzgebiet für 3D-Echtzeit-Gehölzmodelle. Im Rahmen eines Gehölzschnittseminars können an dieser Stelle beispielsweise vorher- und nachher Situationen verbildlicht und simuliert werden.

## 10 Zusammenfassung

Die Entwicklung von Virtual Reality-Technologien spielt im digitalen Zeitalter des 21. Jahrhundert eine immer bedeutendere Rolle und bietet Potential für zahlreiche Branchen. In der Branche des Garten- und Landschaftsbaus lässt sich dies beispielsweise durch die Einbettung von Baummodellen in interaktive Planungsprozesse ableiten, um Fehler und Missverständnisse im Planungsprozess zu vermeiden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich in diesem Zuge mit den Möglichkeiten und Potentialen von generierten Echtzeit-Baummodellen auf der Grundlage von terrestrischem Laserscanning.

Aufgrund von fehlenden Erfahrungswerten und Messuntersuchungen wird durch diese Arbeit ein optimiertes Standardverfahren für die Baumaufnahme mittels terrestrischem Laserscanning aufgestellt. Dies geschieht auf der Basis von mehreren Baumaufnahmen und Programmuntersuchungen. Das Standardverfahren beinhaltet alle Bearbeitungsschritte von der Aufnahme bis zum Echtzeit-Visualisierungsmodell. In diesem Zuge werden zu erwartende Einschränkungen durch Windeinflüsse, Dateigrößen und verschiedene Vegetationsperioden genauer untersucht. Durch den Wind entstehende Messrauschfehler lassen sich mittels Filtervorgänge reduzieren, jedoch nicht ganzheitlich entfernen.

Sowohl das terrestrische Laserscanning als auch die 3D-Visualisierung bieten ein breit gefächertes Grundlagenspektrum, mit dem sich vor der Bearbeitung auseinander gesetzt werden muss. Weiterhin spielen Faktoren der menschlichen Wahrnehmung eine wichtige Rolle, um eine zielgerichtete Visualisierung umzusetzen.

Auf der Basis von Probeaufnahmen werden Scaneinstellungsparameter getestet, um Qualitätsmerkmale zu definieren. Weiterhin werden insgesamt 9 auf dem Markt vertretene Weiterverarbeitungsprogramme detailliert untersucht und auf Funktionen getestet. In Abhängigkeit von der Baumgröße und Vegetationsperiode ergeben sich unterschiedlich anzuwendende Scaneinstellungen. Aufgrund der besten Ergebniserzielung und geringsten Gesamtaufwendung wird Faro Scene als geeignetes Weiterverarbeitungsprogramm ausgewählt und in das Standardverfahren eingebettet. Da im Zuge einer Vermaschung keine zielführenden Ergebnisse erreicht werden, erfolgt die Darstellung der Baummodelle in Form einer Punktwolkenvisualisierung. Hierzu wird 3ds Max Design mit einem Vray Renderer als geeignetes Programm ausgewählt. Durch den Vergleich mit be-

203



stehenden 3D-Gehölzdatenbanken wird die Tauglichkeit der Punktwolkenvisualisierung bekräftigt.

Die aus den Probeaufnahmen gewonnenen Erkenntnisse werden für die Aufnahmen weiterer Baummodelle angewendet. Hierzu wird das entwickelte Standardverfahren mit einem Anwendungsbeispiel von 2 Bäumen gleicher Gattung und Art unterschiedlichen Alters durchgeführt.

## **Abstract**

Virtual reality developments play an important and rising part in the 21st digital century and offer capabilities for lots of branches. The embedding of 3 dimensional-tree models in an interactive planning process for example is an option for the branch of gardening and landscaping to avoid any planning errors and misunderstandings. This master thesis deals with the possibilities and potentials of generated real-time tree models based on terrestrial laser scanning.

Due to missing experiences and measurement examinations this thesis set up an optimized standard process for tree shots with terrestrial laser scanning. It rest on a number of tree shots and program examinations. The standard process includes all processing steps from the shot to the real-time visualization model and expected constraints like wind influences, file sizes and different vegetation periods will be examined. The wind can cause measurement noise errors and these errors can be reduced by filtration processes but a holistic removal is not possible.

The topic of terrestrial laser scanning and 3 dimensional-visualization offers a wide range of basic knowledge. To deal with it before starting the process is very important and further factors of the human perception play an important role to implement targeted visualizations.

Scan setting parameters based on test shots are used to define quality characteristics. Also, nine processing programs with its functions will be examined and tested. The relevant scan settings are different and depend on the tree size and the vegetation period. Due to the best results and the reduced overall time expenditure Faro Scene is selected as the most suitable processing program. The meshing of models did not achieve any positive results. Therefore, the presentation of the tree models takes place as point cloud visualization. In this context Autodesk 3ds Max Design in combination with the Vray Renderer will be chosen as the suitable visualization program. In comparison to existing 3 dimensional-tree databases the suitability of the achieved point cloud visualization will be affirmed.

The new findings of the test shots and the defined standard process will be used for two more tree shots with the same species but different ages.

## Literaturverzeichnis

**ACT-3D B.V.** (2012): Quest-3D – Amazing for fly-throughs and 3D simulations. URL: <http://quest3d.com/> (aufgerufen am 15.04.2017).

**AEROWEST, KARTENDATEN** (2017), **GEOBASIS-DE/BKG** (2017) u. **GOOGLE** (2009): Kartenauszüge aus Google Maps. URL: <https://www.google.de/maps> (aufgerufen am 04.05.2017).

**AJLANI, Ayman** (2008): Dreidimensionale Erfassung der beiden Hallen des Fahrzeugwerkes FWW GmbH in Neubrandenburg mit einem 3DLaserscannsystem HDS6000. Hochschule Neubrandenburg – Studiengang Geoinformatik und Geodäsie: Masterarbeit, Neubrandenburg. URL: [http://digibib.hs-nb.de/file/dbhsnb\\_derivate\\_0000000169/Masterarbeit-Ajlani-2008.pdf](http://digibib.hs-nb.de/file/dbhsnb_derivate_0000000169/Masterarbeit-Ajlani-2008.pdf) (aufgerufen am 29.12.2016).

**ALEXANDER, Kerstin** (2013): Kompendium der visuellen Information und Kommunikation. Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.

**ALPHAPIXEL LLC** (2017): Visual Nature Studio 3. URL: <https://www.3dnature.com/index.php/products/vns-3/> (aufgerufen am 15.04.2017).

**AUTODESK** (2016): Autodesk App Store für Autodesk® 3ds Max. URL: <https://apps.autodesk.com/3DS-MAX/de/Home/Index> (aufgerufen am 12.04.2017).

**AUTODESK** (2017 a): 3ds Max 2017 – Software für Modelle, Animationen und Visualisierungen in 3D. URL: <http://www.autodesk.de/products/3ds-max/overview> (aufgerufen am 12.04.2017).

**AUTODESK** (2017 b): Autodesk ReCap – Compare Products. URL: <https://www.autodesk.com/products/recap/compare> (aufgerufen am 06.07.2017).

**BAUMGÄRTEL, Tobias, BORRMANN, André, GÜNTNER, Willibald A., JULI, Rudolf, KLAUBERT, Cornelia, LEDERHOFER, Erhard, MACK, Jürgen u. WILLBERG, Uwe**: Bauen heute und morgen. In: **GÜNTNER, Willibald A. u. BORRMANN, André** [Hrsg.] (2011): Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen – Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. S.1-21.

**BIENERT, Anne** (2013): Automatische Extraktion von 3D-Baumparametern aus terrestrischen Laserscandaten. Technische Universität Dresden – Fakultät Umweltwissenschaften: Dissertation. URL: [http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/11768/Dissertation\\_Bienert\\_2013.pdf](http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/11768/Dissertation_Bienert_2013.pdf) (aufgerufen am 29.12.2016).

**BÖHLER, Wolfgang, HEINZ, Guido, MARBS, Andreas u. SIEBOLD, Mirko** (2002): Effizientere Dokumentation in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie durch Anwendung von 3D-Scannern. Fachhochschule Mainz – Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik (i3mainz): Schlussbericht zum Forschungsprojekt im Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zur Förderung der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung an Fachhochschulen (aFuE), Förderrunde 2002 (FKZ 1702602). URL: [https://www.tib.eu/en/search/download/?tx\\_tibsearch\\_search%5Bdocid%5D=TIB-KAT%3A483686158&tx\\_tibsearch\\_search%5Bsearchspace%5D=tn&cHash=0a671c555ffcc055e-0e2c2f23ba36060#download-mark](https://www.tib.eu/en/search/download/?tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIB-KAT%3A483686158&tx_tibsearch_search%5Bsearchspace%5D=tn&cHash=0a671c555ffcc055e-0e2c2f23ba36060#download-mark) (aufgerufen am 29.12.2016).

**BORRMANN**, André u. **GÜNTNER**, Willibald A.: Bauen heute und morgen - Die Digitale Baustelle und ihre Herausforderungen. In: **GÜNTNER**, Willibald A. u. **BORRMANN**, André [Hrsg.] (2011): Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen – Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. S.2-7.

**BREMER**, Magnus, **JOCHER**, Andreas u. **RUTZINGER**, Martin (2012): Comparison of branch extraction for deciduous single trees in leaf-on and leaf-off conditions – an eigenvector based approach for terrestrial laserscanning point clouds. EARSelProceedings 11 (2012(1)). Innsbruck/Strasbourg. S.33-43. URL: [http://www.e proceedings.org/static/vol11\\_1/11\\_1\\_bremer1.pdf?SessionID=1c78427d-58c27a772d328](http://www.e proceedings.org/static/vol11_1/11_1_bremer1.pdf?SessionID=1c78427d-58c27a772d328) (aufgerufen am 10.03.2017).

**BRENNER**, Claus (2008): Interpretation terrestrischer Scandaten. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv) 133.Jg. (2008) (3). S.170-179. URL: [https://www.ikg.uni-hannover.de/fileadmin/ikg/staff/publications/Begutachtete\\_Zeitschriftenartikel\\_und\\_Buchkapitel/Brenner\\_zfv2008.pdf](https://www.ikg.uni-hannover.de/fileadmin/ikg/staff/publications/Begutachtete_Zeitschriftenartikel_und_Buchkapitel/Brenner_zfv2008.pdf) (aufgerufen am 15.03.2017).

**BRENNER**, Claus u. **HAALA**, Norbert (2000): Erfassung von 3D-Stadtmodellen. Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie. Stuttgart. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Norbert\\_Haala/publication/242081532\\_Erfassung\\_von\\_3D\\_Stadtmodellen/links/0a85e52dcd0c7cdb31000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Norbert_Haala/publication/242081532_Erfassung_von_3D_Stadtmodellen/links/0a85e52dcd0c7cdb31000000.pdf) (aufgerufen am 29.12.2016).

**BUCHBACH**, Ralf (2012): Ausdünnung von Dreiecksnetzen. Georg-August-Universität Göttingen – Zentrum für Informatik: Seminararbeit. URL: [http://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/scg11\\_buchbach\\_a.pdf](http://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/scg11_buchbach_a.pdf) (aufgerufen am 26.03.2017).

**BUCKSCH**, Alexander K. (2011): Revealing the skeleton from imperfect point clouds. Technical University of Delft – Faculty Aerospace Engineering: Dissertation. URL: <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:45a7a7ac-a658-4274-9899-6f7e34d63334?collection=research> (aufgerufen am 10.03.2017).

**BURGER**, Mathias, **WUJANZ**, Daniel u. **NEITZEL**, Frank (2017): Segmentierung von Punktwolken anhand von geometrischen und radiometrischen Informationen. Beitrag zu 16. Oldenburger 3D-Tage – Optische 3D-Messtechnik – Photogrammetrie – Laserscanning (01.-02.02.2017): Manuskript. URL: [https://www.researchgate.net/publication/314138363\\_Segmentierung\\_von\\_Punktwolken\\_anhand\\_von\\_geometrischen\\_und\\_radiometrischen\\_Informationen](https://www.researchgate.net/publication/314138363_Segmentierung_von_Punktwolken_anhand_von_geometrischen_und_radiometrischen_Informationen) (aufgerufen am 29.03.2017).

**CLOUDCOMPARE** (2017): 3D point cloud and mesh processing software. URL: <http://www.danielgm.net/cc/> (aufgerufen am 17.09.2017).

**CSC** (2008): Digital Disruptions – Technology Innovations Powering 21<sup>st</sup> Century Business. Leading Edge Forum. In: B-WISE GMBH (2008): Technologischer Wandel – Auswirkungen digitaler Trends auf Unternehmen. URL: <https://www.business-wissen.de/artikel/technologischer-wandel-auswirkungen-digitaler-trends-auf-unternehmen/> (aufgerufen am 01.10.2017).

- DASSOT**, Mathieu, **BARBACCI**, Adelin, **COLIN**, Aurelie, **FOURNIER**, Meriem u. **CONSTANT**, Thierry (2010): Tree architecture and biomass assessment from terrestrial LiDAR measurements: a case study for some Beech trees (*Fagus sylvatica*). In: **KOCH**, Barbara, **KÄNDLER**, Gerald u. **TEGUEM**, Christelle [Hrsg.]: Proceedings Silvilaser 2010 – The 10<sup>th</sup> International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems. Freiburg. S.206-215. URL: <http://www.isprs.org/proceedings/2010/SilviLaser2010.pdf> (aufgerufen am 11.05.2017).
- DELVAUX DE FENFFE**, G. (2017): Geschichte des Computers. In: WESTDEUTSCHER RUNDFUNK KÖLN (2017): Planet Wissen. URL: [http://www.planet-wissen.de/technik/computer\\_und\\_roboter/geschichte\\_des\\_computers/index.html](http://www.planet-wissen.de/technik/computer_und_roboter/geschichte_des_computers/index.html) (aufgerufen am 03.10.2017).
- DOBRINSKI**, Paul, **KRAKAU**, Gunter, **VOGEL**, Anselm (2010): Physik für Ingenieure. 12., aktualisierte Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner GWV-Verlag.
- DOLD**, Christoph (2010): Ebenenbasierte Verfahren für die automatische Registrierung terrestrischer Laserscans. Leibniz Universität Hannover – Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik: Dissertation (Nr.283).
- DOLL**, Thomas (2011): Segmentierung von 3D-Daten. Hochschule Bonn-Rhein-Sieg – Fachbereich Informatik u. Fraunhofer IAIS: Bachelor-Arbeit. URL: [http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-1631389.pdf](http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-1631389.pdf) (aufgerufen am 29.12.2016).
- EICHLER**, Hans Joachim. u. **EICHLER**, Jürgen (2015): Laser – Bauformen, Strahlenführung, Anwendungen. 8., aktualisierte Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- E-ON SOFTWARE, INC.** (2017a): PlantFactory – The Best 3D Plant Technology on Earth. URL: <http://www.plantfactory-tech.com/> (aufgerufen am 15.04.2017).
- E-ON SOFTWARE, INC.** (2017b): Cornucopia 3D – Free plants Quercus robur. URL: [https://secure.cornucopia3d.com/purchase.php?item\\_id=14005](https://secure.cornucopia3d.com/purchase.php?item_id=14005) (aufgerufen am 29.10.2017).
- FARO** (2013 a): Faro® Laser Scanner Focus 3D Handbuch. Februar 2013.
- FARO** (2013 b): Faro® Laser Scanner Focus 3D – Marktführer der 3D-Dokumentation. Technisches Datenblatt. März 2013.
- FARO** (2017): Faro® Scene 7.0 – Klassische Bedienungsanleitung. Mai 2017.
- FARO EUROPE GMBH & Co. KG** (2016): Faro® Laser Scanner Focus s 350 Technisches Datenblatt. Oktober 2016. –Download Center-Technische Datenblätter- URL: <http://www.faro.com/de-de/download-centre/search-results/search-item?document=3e3d63d9-fe11-60f4-9d6c-ff000085c7a7> (aufgerufen am 10.05.2017)
- FARO EUROPE GMBH & Co.KG** (2017a): Über Faro – Fakten – Meilensteine. URL: <http://www.faro.com/de-de/ueber-faro/fakten/milestones> (aufgerufen am 04.05.2017).
- FARO EUROPE GMBH & Co.KG** (2017b): Scene – Die 3D-Dokumentationssoftware von Faro. URL: <http://www.faro.com/de-de/produkte/faro-software/scene/ueberblick> (aufgerufen am 14.07.2017).



**FARO EUROPE GMBH & Co.KG** (2017c): Quality Setting Function on the Focus3D. URL: [https://knowledge.faro.com/Hardware/Laser\\_Scanner/Focus/Quality\\_Setting\\_Function\\_on\\_the\\_Focus3D](https://knowledge.faro.com/Hardware/Laser_Scanner/Focus/Quality_Setting_Function_on_the_Focus3D) (aufgerufen am 29.10.2017).

**FAVORSKAYA**, Margarita, N. u. **JAIN**, Lakhmi C. (2017): Handbook on Advances in Remote Sensing and Geographic Information Systems – Paradigms and Applications in Forest Landscape Modeling. Springer International Publishing AG 2017.

**FRANKE**, Karl-Heinz, **GASSMANN**, Frank, **KOLLHOFF**, Dietmar u. **MACHLEIDT**, Torsten (2012): Verfahren zur Bearbeitung von 3D-Daten. TU Ilmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung – Fachgebiet Graphische Datenverarbeitung: Beitrag im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes Elektronisches Auge / Flexible 3-D Industriemeßsysteme. URL: [http://zbs-ilmenau.de/pdf/Verfahren\\_Bearbeitung\\_3D.pdf](http://zbs-ilmenau.de/pdf/Verfahren_Bearbeitung_3D.pdf) (aufgerufen am 27.01.2017).

**FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.** (2017): Laserscanner MENSIGS 25- content- documentes-Ausstattung URL:- [http://www.hro.ipa.fraunhofer.de/content/dam/agp/de/documents/Ausstattung/Geraete/Messen\\_grA/3D-Laserscanner\\_Mensi\\_GS25.pdf](http://www.hro.ipa.fraunhofer.de/content/dam/agp/de/documents/Ausstattung/Geraete/Messen_grA/3D-Laserscanner_Mensi_GS25.pdf) (aufgerufen am 11.05.2017)

**GEOMAGIC** (2016): Geomagic Wrap® - Die Revolution der 3D Arbeitsweise. URL: <http://www.geomagic.com/de/products/wrap/overview> (aufgerufen am 18.08.2017).

**GRAFL**, Andreas (2012): Baummodellierung mit Hilfe von terrestrischem Laserscanning durch Zeichnen auf erstellten Platkarten. Technische Universität Wien – Studienrichtung Vermessung und Katasterwesen, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung: Diplomarbeit. URL: [https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_211207.pdf](https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_211207.pdf) (aufgerufen am 26.01.2017).

**HILLER**, Stefan, **COLDITZ**, Carsten u. **DEUSSEN**, Oliver (2003): Spezifikation und Echtzeitvisualisierung von Vegetation und Landschaften. In: **SCHULZE**, Thomas, **SCHLECHTWEG**, Stefan u. **HINZ**, Volkmar (2006): Simulation und Visualisierung 2003 – Proceedings der Tagung, 6.-7. März 2003, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. S.115-128. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bs-z:352-opus-24441> (aufgerufen am 29.12.2016).

**HOCHSCHULE OSNABRÜCK** (2017): Logo der Hochschule Osnabrück. URL: <https://www.hs-osnabrueck.de/de/> (aufgerufen am 01.12.2017).

**HUANG**, Peng u. **PRETZSCH**, Hans (2010): Using terrestrial laser scanner for estimating leaf areas of individual trees in a conifer forest. Trees (2010) (24). New York: Springer-Verlag. S.609-619.

**IDV INC.** (2016): Speedtree. URL: <http://www.speedtree.com/> (aufgerufen am 15.04.2017).

**IDV INC.** (2017): Speedtree – White Oak Species Pack. URL: [https://store.speedtree.com/product/white\\_oak\\_species\\_pack/](https://store.speedtree.com/product/white_oak_species_pack/) (aufgerufen am 29.10.2017).

**JANSA**, Josef u. **STANEK**, Heinz (2003): Ableitung von Stadtmodellen aus Laser-Scanner-Daten, Grundrissplänen und photographischen Aufnahmen. VGI- Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformationen 91 (2003) (4). S.262-270. URL: [https://geo.tuwien.ac.at/fileadmin/editors/VGI/VGI\\_200333\\_Jansa.pdf](https://geo.tuwien.ac.at/fileadmin/editors/VGI/VGI_200333_Jansa.pdf) (aufgerufen am 29.12.2016).

**JOECKEL**, Rainer, **STOBER**, Manfred, **HUEP**, Wolfgang, (2008): Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung – und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Heidelberg: Wichmann Verlag.

**KERN**, Fredie (2003): Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig – Fachbereich Bauingenieurwesen: Dissertation. URL: [http://www.xdesy.de/paper/fkern\\_dissertation.pdf](http://www.xdesy.de/paper/fkern_dissertation.pdf) (aufgerufen am 05.05.2017).

**KERSTEN**, Th., **STERNBERG**, H., **MECHELKE**, K. u. **LINDSTAEDT**, M. (2005): Zur Objektgenerierung in Punktwolken des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 mit der Modellierungssoftware 3Dipsos. Beitrag zum 65. DVW-Seminar (Terrestrisches Laserscanning (TLS) – Eingegodätisches Messverfahren mit Zukunft) am 21. u. 22.11.2005, Fulda: Schriftenreihe des DVW, Band 48, Augsburg: Wißner-Verlag. S.127-146. URL: [https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/Geomatik/Labor\\_Photo/publik/fulda2005\\_kersten\\_et\\_al.pdf](https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/Geomatik/Labor_Photo/publik/fulda2005_kersten_et_al.pdf) (aufgerufen am 17.03.2017).

**KERSTEN**, Thomas P., **LINDSTAEDT**, Maren, **MAZIULL**, Lena, **SCHREYER**, Kristin, **TSCHIRSCHWITZ**, Felix u. **HOLM**, Knut R. (2015): 3D-Erfassung, Modellierung und Visualisierung der Festungsanlage Kristiansten in Trondheim durch Photogrammetrie und terrestrisches Laserscanning im Rahmen von ERASMUS-Programmen. In: **KERSTEN**, Thomas P. [Hrsg.]: Bridging Scales – Skalenübergreifende Nah- und Fernerkundungsmethoden. Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) Tagungsband (2015) (24). München. S.78-89. URL: [https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/Geomatik/Labor\\_Photo/publik/10\\_DGPF2015\\_Kersten\\_et\\_al.pdf](https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/Geomatik/Labor_Photo/publik/10_DGPF2015_Kersten_et_al.pdf) (aufgerufen am 27.01.2017).

**KERSTEN**, Thomas, **STERNBERG**, Harald, **MECHELKE**, Klaus u. **LINDSTAEDT**, Maren (2008): Datenfluss im terrestrischen Laserscanning – Von der Datenerfassung bis zur Visualisierung. Beiträge zum 79. DVW-Seminar am 6. Und 7. November 2008, Hannover: Schriftenreihe des DVW, Band 54, Augsburg: Wißner-Verlag, S.31-56, URL: [https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/Geomatik/Labor\\_Photo/publik/fulda\\_tls2008\\_kersten\\_et\\_al.pdf](https://www.hcu-hamburg.de/fileadmin/documents/Geomatik/Labor_Photo/publik/fulda_tls2008_kersten_et_al.pdf) (aufgerufen am 23.12.2016).

**KLEMMT**, Hans-Joachim, **BIBER**, Peter u. **PRETZSCH**, Hans (2004): Modellierung des Waldwachstums - Mit Silva in die Zukunft des Waldes blicken. Wald – Wissenschaft – Praxis, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) aktuell 46 (2004). S.38-40. URL: [https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a46\\_mit\\_silvia\\_in\\_die\\_zukunft\\_des\\_waldes\\_blicken.pdf](https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a46_mit_silvia_in_die_zukunft_des_waldes_blicken.pdf) (aufgerufen am 17.04.2017).

**KOLBE**, Anne (2010): Bestandserfassung eines denkmalgeschützten Gebäudekomplexes unter Verwendung des terrestrischen Laserscanners FARO Photon 120 und der dazugehörigen Software. Hochschule Neubrandenburg – Studiengang Vermessungswesen, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen: Diplomarbeit. URL: [http://digibib.hs-nb.de/file/dbhsnb\\_derivate\\_0000000640/Diplomarbeit-Kolbe-2010.pdf](http://digibib.hs-nb.de/file/dbhsnb_derivate_0000000640/Diplomarbeit-Kolbe-2010.pdf) (aufgerufen am 26.01.2017).

**LANGE**, Eckart, **SCHROTH**, Olaf u. **WISSEN**, Ulrike (2004): Fallbeispiele von 3D-Visualisierungen zur partizipativen Landschaftsentwicklung. *Géomatique Suisse* (2004) (4), S. 246-249. URL: [http://www.geomatik.ch/fileadmin/redaktion/download/2004/Fach/FA\\_4\\_2004\\_3.pdf](http://www.geomatik.ch/fileadmin/redaktion/download/2004/Fach/FA_4_2004_3.pdf) (aufgerufen am 29.12.2016).

**LAUBWERK GMBH** (2011a): Laubwerk – 3D Plants for CG Artists. URL: <http://www.laubwerk.com/> (aufgerufen am 15.04.2017).

**LAUBWERK GMBH** (2011b): Laubwerk – Pflanzenkit 1 und 2, Quercus robur und Quercus rubra. URL: <http://www.laubwerk.com/store/plants-kit-2/> (aufgerufen am 29.10.2017).

**LAUBWERK GMBH** (2011c): Laubwerk – Pflanzenkit, Zugriff über Portal der Hochschule Osnabrück, Modul Visualisierung und Präsentation 2016.

**LEICA GEOSYSTEMS AG – PART OF HEXAGON** (2017a): Leica Laser Scanner P30/P40 Technisches Datenblatt. o.M. 2017- products-laser-scanner-scanners- URL:- [leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica\\_scanstation\\_p30-p40\\_bim\\_ds.ashx?la=en](http://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_scanstation_p30-p40_bim_ds.ashx?la=en) (aufgerufen am 10.05.2017).

**LEICA GEOSYSTEMS AG – PART OF HEXAGON** (2017b): Leica Cyclone Verarbeitungssoftware für 3D-Punktwolken – Eine Komplettlösung für Arbeitsergebnisse aus Punktwolken. URL: <http://leica-geosystems.com/de-de/products/laser-scanners/software/leica-cyclone> (aufgerufen am 19.07.2017).

**LEITNER**, Bernd, **HESINA**, Gerd u. **BRIMMER**, Friedrich (2011): Zusammenführung und interaktive Analyse von hochauflösenden 3D Geodaten. Zentrum für Virtual Reality und Visualisierung (VRVis) Forschungs-GmbH. Wien (Österreich). URL: <http://www.vrvis.at/publications/pdfs/PB-VRVis-2011-016.pdf> (aufgerufen am 27.01.2017).

**LICHTENSTEIN**, Maria (2011): Strukturbasierte Registrierung von Punktwolken unter Verwendung von Bild- und Laserscannerdaten. Rheinisch-Westfälische-Technische-Hochschule Aachen – Fakultät für Bauingenieurwesen: Dissertation. URL: <http://d-nb.info/1018188835/34> (aufgerufen am 26.01.2017).

**LINDSTAEDT**, Maren, **KERSTEN**, Thomas, **MECHELKE**, Klaus u. **GRAEGER**, Tanja (2012): Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner – Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg. In: **LUHMANN**, Thomas u. **MÜLLER**, Christian [Hrsg.] (2012): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012. Berlin u. Offenbach: Wichmann VDE Verlag GmbH, S.264-275. URL: [https://www.researchgate.net/publication/259590269\\_Pruefverfahren\\_fur\\_terrestrische\\_Laserscanner\\_-\\_Gemeinsame\\_geometrische\\_Genauigkeitsuntersuchungen\\_verschiedener\\_Laserscanner\\_an\\_der\\_HCU\\_Hamburg](https://www.researchgate.net/publication/259590269_Pruefverfahren_fur_terrestrische_Laserscanner_-_Gemeinsame_geometrische_Genauigkeitsuntersuchungen_verschiedener_Laserscanner_an_der_HCU_Hamburg) (aufgerufen am 29.12.2016).

**MACH**, Rüdiger u. **PETSCHKE**, Peter (2006): Visualisierung digitaler Gelände- und Landschaftsdaten. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

**MARBS**, Andreas (2003): Erfahrungen mit 3D Scanning am i3mainz. Projekt im Zukunfts-investitionsprogramm der Bundesregierung (zip) an der Fachhochschule Mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik –i3mainz. Mainz. URL: <http://i3mainz.hs-mainz.de/sites/default/files/public/data/3dscanning.pdf> (aufgerufen am 29.12.2016).

**MARLIN STUDIOS** (2016a): TreeFarm – High Quality 3D Tree Models. URL: <http://www.marlinstudios.com/products/treefarm/treefarm.html> (aufgerufen am 29.10.2017).

**MARLIN STUDIOS** (2016b): Free TreeFarm sample model, decidus sample. URL: <http://www.marlinstudios.com/samples/samptreefarm.htm> (aufgerufen am 29.10.2017).

**MAXON COMPUTER** (2017): Warum Cinema 4D?. URL: <https://www.maxon.net/de/produkte/cinema-4d/cinema-4d/> (aufgerufen am 12.04.2017).

**MENSI** (o.J.): Mensi- hardware- technical specification. URL:- <http://mensi.free.fr/english/specsoi.htm> (aufgerufen am 11.05.2017).

**NEITZEL**, Frank, **GORDON**, Bianca u. **WUJANZ**, Daniel (2014): Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). DVW-Merkblatt (2014) (7). URL: <http://www.dvw.de/dvw-iso/17364/verfahren-zur-standardisierten-berpr-fung-terrestrischen-laserscannern-tls> (aufgerufen am 02.03.2017).

**ngPLANT** (o.J.a): ngPlant – Open Source plant modelling. URL: <http://ngplant.org/> (aufgerufen am 15.04.2017).

**ngPLANT** (o.J.b): ngPlant – Archive Models, Oak and Maple Tree. URL: <http://ngplant.org/?cat=4> (aufgerufen am 29.10.2017).

**NOTH**, Vanessa (2012): 3D-Visualisierung auf Grundlage von Punktwolken am Beispiel der Altstadt Wangen im Allgäu. Hochschule Bochum – Fachbereich und Geoinformatik: Bachelorarbeit. URL: [http://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/media/fb\\_v/labore/photogrammetrie/Absolventen/Bachelorarbeit\\_Vanessa\\_Noeth.pdf](http://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/media/fb_v/labore/photogrammetrie/Absolventen/Bachelorarbeit_Vanessa_Noeth.pdf) (aufgerufen am 11.01.2017).

**ONYX COMPUTING, INC.** (2017a): Onyx Computing – The creators of the leading procedural modeling software for vegetation. URL: <http://www.onyxtree.com/> (aufgerufen am 15.04.2017).

**ONYX COMPUTING, INC.** (2017b): Onyx Computing – Broadleaf Collection. URL: <http://www.onyxtree.com/nurseryBRO.html> (aufgerufen am 29.10.2017).

**PFEIFER**, Norbert, **GORTE**, Ben u. **WINTERHALDER**, Daniel (2004): Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data. Technical University of Delft – Section of Photogrammetry and Remote Sensing and University of Freiburg – Institute for Forest Growth. Netherlands and Germany. URL: [http://www.lr.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen\\_en\\_Leerstoelen/Afdeling\\_RS/Optical\\_and\\_Laser\\_Remote\\_Sensing/Publications/Papers/015-2004/doc/automatic\\_reconstruction.pdf](http://www.lr.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen_en_Leerstoelen/Afdeling_RS/Optical_and_Laser_Remote_Sensing/Publications/Papers/015-2004/doc/automatic_reconstruction.pdf) (aufgerufen am 26.03.2017).

**PFEIFER**, Norbert, **HARING**, Alexander u. **BRIESE**, Christian (2007): Automatische Auswertung im terrestrischen Laserscanning. Technische Universität Wien – Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung. Wien. URL: [https://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo\\_2095.pdf](https://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo_2095.pdf) (aufgerufen am 10.03.2017).

**PIECES MULTIMEDIA PRODUCTION** (2016): Download New Free 2016 3D Scenes Compound Furnished and ready to use in 3ds Max, Vray. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=m84sYt3rjzw>; Download: <http://www.mediafire.com/file/vgr35zu1qr0e4t1/Small+Compound.zip> (aufgerufen am 09.12.2017).

**PLANK**, Claus, **STOCKBAUER**, Wolfgang u. **STRACKENBROCK**, Bernhard.: Digitales Geländemodell – moderne Methoden der Erfassung und Verarbeitung. In: **GÜNTHER**, Willibald A. u. **BORRMANN**, André [Hrsg.] (2011): Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen – Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. S.43-60.

**POLLERT**, A., **KIRCHNER**, B. u. **POLLERT**, M. C. (2016): Duden – Wirtschaft von A bis Z. In: BUNDESZENTRALE FÜR POLITISCHE BILDUNG (2016): technischer Fortschritt. URL: <http://www.bpb.de/nachschlagen/lexika/lexikon-der-wirtschaft/20828/technischer-fortschritt> (aufgerufen am 01.10.2017).

**PRETZSCH**, Hans, **SEIFERT**, Stefan u. **HUANG**, Peng (2011): Beitrag des terrestrischen Laserscannings zur Erfassung der Struktur von Baumkronen. Schweiz Z Forstwes (schweizerische Zeitschrift für Forstwesen) 162 (2011) (6), S.186-194. Url: <http://www.szf-jfs.org/doi/pdf/10.3188/szf.2011.0186> (aufgerufen am 29.12.2016).

**RAABE**, Susanne, **HEINS**, Marcel u. **ROCKMANN**, Lisa (2015): Grüne Stadtentwicklung der Zukunft: Visionen zur Beteiligung an der städtischen Grünflächenplanung mit Unterstützung von Augmented Reality Technologien. In: **SCHRENK**, Manfred, **POPOVICH**, Vasily V., **ZEILE**, Peter, **ELISEI**, Pietro u. **BEYER**, Clemens [Hrsg.] (2015): Plan together right now overall – from Vision to Reality for Vibrant Cities and Regions. Tagungsband – Beiträge zur 20. internationalen Konferenz zur Stadtplanung, Regionalentwicklung und Informationsgesellschaft. S.323-332. URL: [http://programm.corp.at/cdrom2015/files/CORP2015\\_proceedings.pdf](http://programm.corp.at/cdrom2015/files/CORP2015_proceedings.pdf) (aufgerufen am 24.03.2017).

**REINWALD**, Florian, **SCHÖBER**, Christian u. **DAMYANOVIC**, Doris (2013): From Plan to Augmented Reality – Workflow for Successful Implementation of AR Solutions in Planning and Participation Processes. In: **SCHRENK**, Manfred, **POPOVICH**, Vasily V., **ZEILE**, Peter u. **ELISEI**, Pietro [Hrsg.] (2013): Planning Times – You better keep planning or you get in deep water, for the cities they are a-changin'... - Proceedings Tagungsband, 20.-23. Mai 2013, Italien (Beiträge zur 18. Internationalen Konferenz zu Stadtplanung, Regionalentwicklung und Informationsgesellschaft). S.339-348. URL: [http://www.corp.at/archive/CORP2013\\_110.pdf](http://www.corp.at/archive/CORP2013_110.pdf) (aufgerufen am 17.03.2017).

**REITBERGER**, Josef (2010): 3D-Segmentierung von Einzelbäumen und Baumartenklassifikation aus Daten flugzeuggetragener Full Waveform Laserscanner. Technische Universität München – Institut für Photogrammetrie und Kartographie: Dissertation. [https://www.researchgate.net/profile/Josef\\_Reitberger/publication/44022031\\_3D-Segmentierung\\_von\\_Einzelbaumen\\_und\\_Baumartenklassifikation\\_aus\\_Daten\\_flugzeuggetragener\\_Full\\_Waveform\\_Laserscanner/links/0912f5098025da4499000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Josef_Reitberger/publication/44022031_3D-Segmentierung_von_Einzelbaumen_und_Baumartenklassifikation_aus_Daten_flugzeuggetragener_Full_Waveform_Laserscanner/links/0912f5098025da4499000000.pdf) (aufgerufen am 29.12.2016).

**RENDERMALL GMBH** (2012a): VB Visual – Low Poly 3d Plants – Textures – Cut Out Plants – Billboards



– DXF-Files. URL: <https://vbvisual.rendermall.com/> (aufgerufen am 15.04.2017).

**RENDERMALL GMBH** (2012b): VB Visual – VB Visual freigestellte Pflanzen, Herbst, Frühling und Sommer. URL: [https://vbvisual.rendermall.com/media/files\\_public/info/VBCP\\_P\\_SES\\_spring00-000-00-00.PDF](https://vbvisual.rendermall.com/media/files_public/info/VBCP_P_SES_spring00-000-00-00.PDF) (aufgerufen am 29.10.2017).

**RENDERMALL GMBH** (2012c): VB Visual – Low Poly 3d Plants – Textures – Cut Out Plants – Billboards – DXF-Files, Zugriff über Portal der Hochschule Osnabrück, Modul Visualisierung und Präsentation 2016.

**RICHTER, Rico u. DÖLLNER, Jürgen** (2011): Integrierte Echtzeit-Visualisierung von massiven 3D-Punktwolken und georeferenzierten Texturdaten. PFG (Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation) (2011) (3). Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. S.145-154. URL: [http://www.dgpf.de/pfg/2011/pfg2011\\_3\\_Richter.pdf](http://www.dgpf.de/pfg/2011/pfg2011_3_Richter.pdf) (aufgerufen am 02.03.2017).

**RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GMBH** (2017): RIEGL Laser Scanner VZ-6000 Datenblatt. Januar 2015- products-laser-terrestrial-scanning URL:- [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/Datasheet\\_VZ-6000\\_2015-01-22.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/Datasheet_VZ-6000_2015-01-22.pdf) (aufgerufen am 11.05.2017).

**ROLOFF, Andreas u. BÄRTELS, Andreas** (2014): Flora der Gehölze – Bestimmung, Eigenschaften und Verwendung. Vierte, komplett aktualisierte und erweiterte Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag.

**RUTENFRANZ, U.** (1997): Wissenschaft im Informationszeitalter – Zur Bedeutung des Mediums Computer für das Kommunikationssystem Wissenschaft. Opladen: Westdeutscher Verlag.

**SAEGER, Harald** (2017): Verkaufingenieur Leica Geosystems, E-Mail-Informationen über Cyclone vom 20.07.2017.

**SCHILLING, A., SCHMIDT, A., MAAS, H.-G. u. WAGNER, S.** (2012): Topology extraction using depth first search on voxel representations of tree point clouds. Technical University of Dresden, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing and Institute of Silviculture and Forest Protection: Dresden and Tharandt. URL: [https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipf/photogrammetrie/ressourcen/dateien/forschung/publikationen/pubdocs/2011/2011\\_Schilling\\_Calgary.pdf?lang=de](https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipf/photogrammetrie/ressourcen/dateien/forschung/publikationen/pubdocs/2011/2011_Schilling_Calgary.pdf?lang=de) (aufgerufen am 10.03.2017).

**SCHNEIDER, Danilo** (2008): Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten. Technische Universität Dresden – Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften: Dissertation. URL: [http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/2409/Dissertation\\_Danilo\\_Schneider.pdf](http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/2409/Dissertation_Danilo_Schneider.pdf) (aufgerufen am 10.03.2017).

**SCHUBERT, Stefan** (2014): Optimierter Einsatz eines 3D-Laserscanners zur Point-Cloud-basierten Kartierung und Lokalisierung im In- und Outdoorbereich. Technische Universität Chemnitz – Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik: Masterarbeit. URL: [http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/16141/Masterarbeit\\_Stefan\\_Schubert.pdf](http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/16141/Masterarbeit_Stefan_Schubert.pdf) (aufgerufen am 29.12.2016).

**SEIFERT, Stefan** (2009): Modellierung und Visualisierung des Waldwachstums auf Landschaftsebene. Georg-August-Universität Göttingen – Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie: Disserta-

tion. URL: <https://ediss.uni-goettingen.de/handle/11858/00-1735-0000-0006-B129-6?locale-attribute=de> (aufgerufen am 29.12.2016).

**SPRINGER FACHMEDIEN WIESBADEN GMBH** (2017): Virtuelle Realität. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/virtuelle-realitaet.html> (aufgerufen am 14.10.2017).

**STATISTA GMBH** (2017a): Prognose zur Anzahl der Virtual-Reality-Nutzer weltweit von 2016 bis 2020 (in Millionen). URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/426237/umfrage/prognose-zur-anzahl-der-aktiven-virtual-reality-nutzer-weltweit/> (aufgerufen am 03.10.2017).

**STATISTA GMBH** (2017b): Beliebteste Freizeitaktivitäten, Hobbies und Sportarten in Deutschland nach häufiger Ausübung in den Jahren 2015 bis 2017. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/171168/umfrage/haeufig-betriebene-freizeitaktivitaeten/> (aufgerufen am 03.10.2017).

**STATISTA GMBH** (2017c): Wie oft nutzen Sie Ihren Garten und verrichten Gartenarbeit? URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/20244/umfrage/haeufigkeit-der-gartennutzung-und-gartenarbeit-2007/> (aufgerufen am 03.10.2017).

**STELZL, Harald, WACK, Roland, SACHERER, Oliver, ALMER, Alexander** (2006): Automatisierte Einzelbaum-Visualisierung basierend auf Flugzeug-Laserscanner- und optischen Daten. S.639-644. URL: [http://www.agit.at/php\\_files/myAGIT/papers/2006/5487.pdf](http://www.agit.at/php_files/myAGIT/papers/2006/5487.pdf) (aufgerufen am 29.12.2016).

**TAUBER, Stefan** (2005): Untersuchung zur Mess- und Registriergenauigkeit des Laserscanners Rieg LMS Z360. Universität Hannover – Institut für Kartographie und Geoinformatik: Diplomarbeit. URL: [https://www.ikg.uni-hannover.de/fileadmin/ikg/staff/thesis/finished/documents/da\\_tauber\\_2005.pdf](https://www.ikg.uni-hannover.de/fileadmin/ikg/staff/thesis/finished/documents/da_tauber_2005.pdf) (aufgerufen am 29.12.2016).

**TECHNODIGIT PART OF HEXAGON** (2015): 3DReshaper – The 3D scanner software. URL: <http://www.3dreshaper.com/en/software-en/> (aufgerufen am 22.07.2017).

**TRIMBLE INC.** (2017a): Laserscanner TX8 Datenblatt o.M. 2016- products- products by application- 3D laserscanning-Trimble TX8 URL:- [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-827363/022516-014G-DEU\\_TrimbleTX8\\_DS\\_A4\\_1016\\_LR.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-827363/022516-014G-DEU_TrimbleTX8_DS_A4_1016_LR.pdf) (aufgerufen am 11.05.2017)

**TRIMBLE INC.** (2017b): Trimble Realworks – Ein mächtiges 3D-Laserscanning- Auswertesoftware-Paket. URL: [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-241897/022543-123K-DEU\\_TrimbleRealWorks\\_TN\\_A4\\_0416\\_LR.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-241897/022543-123K-DEU_TrimbleRealWorks_TN_A4_0416_LR.pdf) (aufgerufen am 11.08.2017).

**VIRTUALGRID** (2003-2017): VRMesh Studio. URL: <http://vrmesh.com/products/studio.asp> (aufgerufen am 22.07.2017).

**VISION 4D** (2017): C4D-Plugins. URL: <http://www.vision4d.de/c4d-plugins/index.php> (aufgerufen am 12.04.2017).

**VISUAL DYNAMICS ® LLC** (2017): V-Ray 3.6 for 3ds Max. URL: <https://www.vray.com/vray-for-3ds-max/> (aufgerufen am 01.12.2017).

**WISSEN, Ulrike** (2007): Virtuelle Landschaften zur partizipativen Planung – Optimierung von 3D Landschaftsvisualisierungen zur Informationsvermittlung. Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich – Institut für Raum- und Landschaftsentwicklung: Dissertation. URL:

<http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:29681/eth-29681-02.pdf> (aufgerufen am 29.12.2016).

**WITTE**, Bertold, **SPARLA**, Peter, (2015): Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. 8., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Heidelberg: Wichmann VDE-Verlag.

**WUJANZ**, Daniel, **BURGER**, Mathias, **METTENLEITER**, Markus, **NEITZEL**, Frank, **TSCHIRSCHWITZ**, Felix u. **KERSTEN**, Thomas (2017): Ein intensitätsbasiertes stochastisches Modell für terrestrische Laserscanner – Erste Untersuchungen der Z+F IMAGER 5006h und 5010. Beitrag zu 16. Oldenburger 3D-Tage – Optische 3D-Messtechnik – Photogrammetrie – Laserscanning (01.-02.02.2017): Manuskript. URL: [https://www.researchgate.net/publication/313791848\\_Ein\\_intensitatsbasiertes\\_stochastisches\\_Modell\\_fur\\_terrestrische\\_Laserscanner\\_-\\_Erste\\_Untersuchungen\\_der\\_ZF\\_IMAGER\\_5006h\\_und\\_5010](https://www.researchgate.net/publication/313791848_Ein_intensitatsbasiertes_stochastisches_Modell_fur_terrestrische_Laserscanner_-_Erste_Untersuchungen_der_ZF_IMAGER_5006h_und_5010) (aufgerufen am 16.03.2017).

**WUJANZ**, Daniel, **HOLST**, Christoph, **KUHLMANN**, Heiner u. **NEITZEL**, Frank (2016): Standpunktplanung beim terrestrischen Laserscanning. DVW (Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V.) -Schriftenreihe 85 (2016). Augsburg: Wißner-Verlag. S.9-21. URL: [https://www.researchgate.net/publication/311174895\\_Standpunktplanung\\_beim\\_terrestrischen\\_Laserscanning](https://www.researchgate.net/publication/311174895_Standpunktplanung_beim_terrestrischen_Laserscanning) (aufgerufen am 02.03.2017).

**XFROG** (2017a): Xfrog plants. URL: <http://xfrog.com/> (aufgerufen am 15.04.2017).

**XFROG** (2017b): Xfrog Shop, English Oak and Red Oak. URL: [http://xfrog.com/mm5/merchant.mvc?Screen=CTGY&Category\\_Code=species&Per\\_Page=45&Sort\\_By=disp\\_order&Store\\_Code=GOS&Offset=45&Layout=](http://xfrog.com/mm5/merchant.mvc?Screen=CTGY&Category_Code=species&Per_Page=45&Sort_By=disp_order&Store_Code=GOS&Offset=45&Layout=) (aufgerufen am 29.10.2017).

**XFROG** (2017c): Xfrog Software Trials. URL: <http://xfrog.com/category/samples.html> (aufgerufen am 01.12.2017).

**ZEILE**, Peter (2010): Echtzeitplanung – Die Fortentwicklung der Simulations- und Visualisierungsmethoden für die städtebauliche Gestaltungsplanung. Technische Universität Kaiserslautern – Fachbereich Architektur/ Raum- und Umweltplanung/ Bauingenieurwesen: Dissertation. URL: <https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/index/index/docId/2196> (aufgerufen am 02.03.2017).

**ZOGG**, Hans M. u. **SCHULZ**, Thorsten (2006): Terrestrisches Laserscanning in der Geomatik. Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement 104 (2006) (8). S.420-424. URL: <http://www.e-periodica.ch/digbib/view?var=true&pid=geo-007:2006:104::1172#452> (aufgerufen am 26.03.2017).

**ZOLLER + FRÖHLICH GMBH** (2012-2017): Z+F LaserControl®. URL: [http://www.zf-laser.com/Z-F-LaserControl-R.laserscanner\\_software\\_1.0.html](http://www.zf-laser.com/Z-F-LaserControl-R.laserscanner_software_1.0.html) (aufgerufen am 19.07.2017).

**ZOLLER + FRÖHLICH GMBH** (2017 a): Z+F IMAGER® 5010X Datenblatt. o.J. - Produkte-Z+F IMAGER® 5010X - URL:- [http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Datenblaetter/Z\\_F\\_IMAGER\\_5010X\\_System\\_Requirements\\_D\\_FINAL.pdf](http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Datenblaetter/Z_F_IMAGER_5010X_System_Requirements_D_FINAL.pdf) (aufgerufen am 11.05.2017)

**ZOLLER + FRÖHLICH GMBH** (2017 b): Z+F IMAGER® 5010X - Produkte-Z+F IMAGER® 5010X - URL:- [http://www.zf-laser.com/Z-F-IMAGER-R-5010X.3d\\_laser\\_scanner.0.html](http://www.zf-laser.com/Z-F-IMAGER-R-5010X.3d_laser_scanner.0.html) (aufgerufen am 11.05.2017).



## Eidesstattliche Erklärung

„ Ich, Patrick Jost, erkläre hiermit an Eides statt, dass ich meinen Beitrag zur vorliegenden Gruppenarbeit -

Kapitel: 1, 2, 4.2, 5.2

- selbstständig und ohne unzulässige fremde Mittel angefertigt habe; das Gleiche gilt für die von auf dem Titelblatt der Arbeit genannten Autoren gemeinsam verfassten Teile -

Kapitel: 5.1, 5.3, 5.4, 5.5, 6, 7, 8, 9

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.“

Osnabrück, den 04.01.2018

---

Unterschrift

„ Ich, Moritz Thönnissen, erkläre hiermit an Eides statt, dass ich meinen Beitrag zur vorliegenden Gruppenarbeit -

Kapitel: 3, 4.1

- selbstständig und ohne unzulässige fremde Mittel angefertigt habe; das Gleiche gilt für die auf dem Titelblatt der Arbeit genannten Autoren gemeinsam verfassten Teile -

Kapitel: 5.1, 5.3, 5.4, 5.5, 6, 7, 8, 9

die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.“

Osnabrück, den 04.01.2018

---

Unterschrift